

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

# **Simulador de Enlace para Sistemas de Comunicação TTE**

Autor: Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque  
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF  
2015





Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque

## **Simulador de Enlace para Sistemas de Comunicação TTE**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF

2015

---

Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque

Simulador de Enlace para Sistemas de Comunicação TTE/ Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque. – Brasília, DF, 2015-

71 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA , 2015.

1. Comunicação Through-the-Earth (TTE).. 2. Minas Terrestres.. I. Prof. Dr. Leonardo Aguayo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Simulador de Enlace para Sistemas de Comunicação TTE

CDU 02:141:005.6

---

Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque

## **Simulador de Enlace para Sistemas de Comunicação TTE**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de dezembro de 2015:

---

**Prof. Dr. Leonardo Aguayo**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Fabiano Araujo Soares**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Sébastien Roland Marie  
Joseph Rondineau**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2015



Esse trabalho é dedicado ao meu Deus..





# Agradecimentos

Eu agradeço a meu Deus, o qual me guiou durante toda minha vida e está me dando força e sabedoria durante toda a graduação.

Agradeço aos meus pais (Aldivan de Albuquerque Ferreira e Eliã Lisboa Dantas de Albuquerque) por todo amor e carinho por mim, além do apoio de ambos em minhas escolhas e na minha vida. Agradeço a minha irmã e a seu marido, meu cunhado, (Rafaela Lisboa Dantas de Albuquerque Ferreira e Felipe Ferreira) por serem pessoas tão excelentes e grandes amigos que sempre me apoiam e me incentivam.

Agradeço a meu orientador do TCC1 Prof. Dr. Leonardo Aguayo por seus valiosos conselhos, que me ajudaram grandemente a realizar este trabalho.

Agradeço ao meu orientador de Iniciação Científica (IC) Prof. Dr. André Penna, o qual me fez crescer como engenheiro e profissional.



*“Porque o Senhor dá a sabedoria,  
e da sua boca vem o conhecimento  
e o entendimento.” (Provérbios 2.6)*



# Resumo

Minas subterrâneas são ambientes onde são passíveis de ocorrer diversos tipos de desastres, com a maioria destes deixando pessoas presas em seu interior. Ambientes de minas podem possuir condições adversas que fazem pessoas não sobreviverem se submetidas a um certo período de tempo sendo necessário haver uma comunicação entre a equipe de resgate e as vítimas. Entretanto, em uma grande parte dos casos estes acidentes destroem as comunicações utilizadas usualmente nas minas. Com isso é necessário haver um sistema de comunicação de emergência o qual utilize o solo ou rochas para a propagação de sinais que no caso seria o TTE (through-the-earth). O sistema de comunicação TTE é usualmente utilizado na comunicação entre pessoas que trabalham em minas subterrâneas e a equipe que está na superfície da terra. Assim sendo, o foco deste trabalho é na construção de um simulador de enlace para sistemas de comunicação TTE que será construído através do software MATLAB.

**Palavras-chaves:** Through-the-Earth. Minas subterrâneas. Sistema de comunicação.



# Abstract

The underground mines are places susceptible to happen some sorts of accidents that can put people's life on danger. Its environment can be very hazardous, making people die if an accident happen and they don't get out of there quickly. Therefore, it is essential that the rescue team and the accident victims can communicate with each other. However, mine's accidents often destroys the communications systems that are usually used at that environment. So, it is good to have a emergency communication system to situations like that. Therefore, this project proposes the construction of a TTE simulator where it will be a MATLAB based program.

**Key-words:** Through-the-Earth. Mines. Communication system.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de um cabo utilizado em um sistema de comunicação TTW. Obtido de (1). . . . .	25
Figura 2 – Exemplo de um sistema de comunicação utilizando a tecnologia TTA. Obtido de (1). . . . .	26
Figura 3 – Representação de um sistema de comunicação TTE. Obtido de (1). . .	27
Figura 4 – Ilustração de um sistema TTE. Obtido de (1). . . . .	28
Figura 5 – Representação em blocos de um codificador G723.1. Obtido de (2). . .	30
Figura 6 – Definições dos principais pontos do código Reed Solomon. Obtido de (3). . . . .	32
Figura 7 – Exemplos de sinais modulados. Obtido de (4) . . . . .	33
Figura 8 – Tabela mostrando os tipos gerais de modulação e sua classificação . . .	33
Figura 9 – Constelação da modulação BPSK. Obtida de (5) . . . . .	34
Figura 10 – Comparação entre a modulação OFDM e FDM. Obtido de (6). . . . .	35
Figura 11 – Representação na frequência e no tempo de um sinal OFDM. Obtido de (7) . . . . .	36
Figura 12 – Representação do sistema completo em diagrama de blocos. . . . .	39
Figura 13 – Exemplo de figura que será usada para modelagem do canal sendo neste caso a profundidade de 29 metros. Obtido de (8). . . . .	40
Figura 14 – Exemplo de figura que será usada para modelagem do canal sendo neste caso a profundidade de 146.7 metros. Obtido de (8). . . . .	41
Figura 15 – Validação do simulador pela comparação entre curvas $E_b/N_0$ por TEB utilizando a modulação QPSK. . . . .	45
Figura 16 – Validação do simulador pela comparação entre curvas $E_b/N_0$ por TEB utilizando a modulação BPSK. . . . .	46
Figura 17 – Validação do simulador pela comparação entre curvas $E_b/N_0$ por TEB utilizando a modulação 8-PSK. . . . .	46
Figura 18 – Curvas $E_b/N_0$ por TER para os três diferentes casos de ruídos do simulador. . . . .	47
Figura 19 – Curvas $E_b/N_0$ por TEB para um sistema com canal TTE e outro sem canal. . . . .	48
Figura 20 – Curvas $E_b/N_0$ por TEB para um sistema com equalização do canal TTE e outro sem esta. . . . .	49
Figura 21 – Curvas $E_b/N_0$ por TEB para dois valores diferentes do fator de esque- cimento RLS. . . . .	50
Figura 22 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo RLS com o fator de esqueci- mento igual a 0.9 . . . . .	51

Figura 23 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo RLS com o fator de esquecimento igual a 0.6 . . . . .	51
Figura 24 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo LMS com o tamanho do passo igual a 0.1 . . . . .	52
Figura 25 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo LMS com o tamanho do passo igual a 0.5 . . . . .	52
Figura 26 – Curvas $E_b/N_0$ por TEB para três diferentes ordens de modulação. . . .	53
Figura 27 – Curvas $E_b/N_0$ por TEB para quantidades diferentes de subportadoras.	54

# Lista de abreviaturas e siglas

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TTA	Through-the-Air
TTW	Through-the-Wire
TTE	Through-the-Earth
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
FDM	Frequency-Division Multiplexing
PSK	Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation
RS	Reed Solomon
TEB	Taxa de Erro de Bit
BER	Bit Error Rate



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
	<b>Introdução</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Aspectos Gerais - Motivação</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>COMUNICAÇÕES PRESENTES EM MINAS</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>THROUGH-THE-WIRE (TTW)</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>THROUGH-THE-AIR (TTA)</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>THROUGH-THE-EARTH (TTE)</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DIGITAL</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Codificadores de Voz</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Códigos Corretores de Erro</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Modulação do Sinal</b>	<b>32</b>
3.3.1	Modulação PSK	33
3.3.2	Modulação OFDM	34
<b>3.4</b>	<b>Ferramenta de Simulação</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SIMULADOR</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização geral do Sistema</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização dos Blocos do Sistema</b>	<b>41</b>
4.2.1	Bloco de Entrada e Saída	41
4.2.2	Bloco do Código Corretor de Erro	42
4.2.3	Bloco da Modulação e Demodulação	43
<b>4.3</b>	<b>Bloco do Canal e Ruído TTE</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Validação</b>	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise de Resultados</b>	<b>47</b>
5.2.1	Análise tipos de ruídos	47
5.2.2	Presença do Canal TTE	48
5.2.3	Equalização	48
5.2.3.1	Filtro Adaptativos - RLS e LMS	49
5.2.3.2	Gráficos de Erro	50
<b>5.2.4</b>	<b>Ordem da Modulação</b>	<b>53</b>

5.2.5	Número de Portadoras . . . . .	53
6	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXO A – CÓDIGO DO SIMULADOR . . . . .</b>	<b>61</b>

# 1 Introdução

Este documento apresenta o Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília Campus Gama do aluno Rafael Lisboa Dantas de Albuquerque. Este trabalho diz respeito a construção de um simulador de um sistema de comunicação digital sem fio para o uso em minas terrestres em casos de acidentes. Serão abordados os outros tipos de comunicação existentes em mina, porém o foco será no tipo *Through-the-Earth* (TTE).

## 1.1 Aspectos Gerais - Motivação

A ação da mineração tem uma grande importância na economia mundial. As companhias de mineração possuem um valor estimado de 962 bilhões de dólares. Uma grande parte dessas indústrias tem suas atividades principalmente embaixo do solo e com isso necessitam de equipamentos e processos especializados. A mineração juntamente com a agricultura são consideradas tipos de trabalho dos mais antigos e um dos mais importantes para o mundo industrializado. A mineração possui uma grande importância no mundo de hoje, devido ao fato que é de onde é obtido substâncias ou materiais necessários para produzir energia elétrica como óleo e urânio, além de muitos recursos valiosos como água, rocha, ouro, prata, entre outros (1) e (9).

A mineração pode ser dividida em duas categorias: mineração na superfície e mineração subterrânea. O foco deste trabalho será em mineração subterrânea. Este tipo de atividade é uma das mais perigosas devido a seu ambiente. Geralmente, minas subterrâneas são locais bastante úmidos (chegando a ser de 90 ou até mais) além de possuir poeira, água corrosivos, gases tóxicos e explosivos (como dióxido de carbono e metano). Outra característica é que este ambiente é bem dinâmico pois a medida que o trabalho é realizado, o ambiente é expandido. Com isso há a possibilidade de ocorrer diversos tipos de acidentes e desastres como desabamentos, liberação de gases tóxicos, queimadas, inundações, entre outros (9).

Desastres ocorridos em minas subterrâneas geralmente impossibilitam a saída das pessoas que trabalham nesta, deixando-as presas até que chegue o socorro. A equipe de resgate geralmente tem uma grande dificuldade em tirar as vítimas deste ambiente devido ao fato de não saberem a localização e as condições de saúde ou físicas destes. Entretanto, há casos em que o resgate tem de ser feito rapidamente devido ao fato de que em algumas minas subterrâneas há presença de gases tóxicos ou fogo. Com isso é necessário um método para a localização destas pessoas assim como um método para comunicação com estas. Porém, as comunicações usualmente utilizadas nas minas geralmente não funcio-

nam devido ao desastre, sendo assim necessário um sistema de comunicação que funciona através do solo ou de rochas independentemente das condições da mina. Este sistema tem de possuir algumas características fundamentais como: funcionar sobre qualquer aspecto adverso que ocorra na mina, deve possuir custo baixo, ser portátil e deve ser simples de operar (10).

Um estudo realizado em 1982 realizado por Arthur D. Little com a análise de alguns casos ocorridos mostrou que geralmente as vítimas destes desastres morrem tão rapidamente que a maioria das operações de resgate acabam levando muito tempo e falham. Foi chegado a conclusão que as vítimas tem de ser resgatados, dependendo do caso, de uma até cinco horas após o desastre (10).

Nesse contexto, a motivação deste TCC foi: a simulação de um sistema de comunicação TTE onde foi implementada uma simulação de um sistema de comunicação por voz entre a equipe de resgate e as pessoas presas na mina. Para realizar este feito, foi-se necessário a pesquisa de diversos pontos desta comunicação em artigos científicos e o aperfeiçoamento nas habilidades de programação em programas computacionais numéricos.

Portanto, o foco do TCC2 foi, além da complementação da parte teórica com pesquisas bibliográficas, a implementação do simulador do sistema TTE. Houveram algumas mudanças em relação ao que foi proposto no TCC1 porém a idéia geral do trabalho continuou sendo a mesma.

## 1.2 Objetivos

A partir do que foi escrito anteriormente, foram definidos os seguintes objetivos gerais e específicos para TCC2.

**Objetivo geral:** Implementar no software MATALAB o sistema estabelecido na primeira parte do Trabalho de Conclusão do Curso. No qual consistia em um sistema de vários blocos na qual deveria haver a simulação de um sistema de comunicação TTE, no qual um sinal de áudio deveria ser transmitido e receptado.

Para o cumprimento do objetivo geral, foram traçados alguns objetivos específicos:

- Estudo dos tipos de comunicação existentes atualmente nas minas subterrâneas a fim de identificar qual é a que mais se adapta à circunstancia exigida;
- realizar um trabalho de pesquisa sobre os recursos presentes no MATLAB que seriam possíveis para a utilização;
- Estudar sobre os codificadores de voz existentes atualmente para ser utilizado nas condições de extrema atenuação e de baixa banda nas minas;



- Pesquisar os tipos de códigos coletores de erro para deixar a mensagem enviada com maior robustez e ocorrer a comunicação;
- Realizar pesquisas bibliográficas em artigos científicos onde houveram medições do tipo de comportamento de sinais de acordo com a frequência e profundidade em minas subterrâneas. Com estes estudos será possível a especificação e com isso a caracterização de um canal para a simulação computacional.
- Realizar a implementação do sistema proposto no software escolhido, utilizando de recursos do programa, assim como trabalhos realizados por outros.

## 1.3 Metodologia

No TCC1 houveram as seguintes fases:

1. Estudos teóricos e pesquisas bibliográficas sobre o assunto para decisão sobre o projeto;
2. Preparação teórica para a implementação que será realizada no TCC2;
3. Observar possíveis soluções e problemas que podem acontecer neste trabalho;

Por outro lado, no TCC2 houveram as seguintes etapas:

1. Complementação bibliográfica do trabalho realizado no TCC1;
2. Construção do sistema proposto;
3. Alteração de algum fator do sistema para o melhoramento deste;
4. Análise dos resultados obtidos após a construção do simulador.

Este documento foi organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 será uma introdução sobre o assunto, sendo assim uma motivação do trabalho que está sendo realizado, juntamente com a estrutura na qual este trabalho será organizado;
- O Capítulo 2 dará uma visão geral sobre as formas de comunicação existentes nas minas, sendo focado a comunicação TTE.
- O Capítulo 3 conterá toda a fundamentação teórica necessária para compreender os conceitos necessários dos Sistemas de Comunicação Digital empregados neste Trabalho. Dentre os conceitos que serão explicados estão: OFDM, Codificadores de voz, Códigos Corretores de Erro, etc;

- O Capítulo 4 descreverá o simulador da comunicação digital TTE construído neste TCC. Serão mostrados o diagrama de blocos do simulador e, além disso, haverá uma explicação para cada bloco;
- O Capítulo 5 mostrará os resultados do programa criado que serão essencialmente alguns gráficos obtidos através de simulações e discussões sobre estes resultados;
- O Capítulo 6 será a conclusão deste trabalho, sendo falado a síntese do que foi obtido com os resultados e mostrando o que será possível desenvolver neste programa no futuro;

É possível resumir o trabalho deste TCC2 como sendo: Realizar pesquisas bibliográficas complementárias do TCC1 sobre os programas computacionais, codificadores de voz e os sistemas de comunicação existentes nas minas subterrâneas, além da implementação na prática. Portanto, a pesquisa realizada neste trabalho pode ser classificada nos seguintes pontos:

- Pesquisa Exploratória, pois visa levantamento de referências assim como o assunto sobre o tema de textos científicos;
- Pesquisa Bibliográfica, pois se trata de uma leitura sistemática e tem por objetivo o conhecimento das diferentes contribuições científicas disponíveis, de artigos científicos, livros e revistas científicas, sobre o assunto específico;

## 2 Comunicações Presentes em Minas

Devido ao alto risco de acidentes em minas e a dificuldade no resgate, é necessário a implementação de uma tecnologia de comunicação na qual não seja necessário fios ou dependa de uma estação de comunicação dentro da mina. Deve ser preciso apenas algo portátil e de fácil uso, assim como explicado anteriormente. Em uma mina subterrânea, há três possíveis maneiras para utilizar a comunicação entre quem está na superfície da terra e quem está embaixo da superfície que são: Through-the-Earth (TTE), Through-the-Wire (TTW) e Through-the-Air (TTA). Cada uma destas é utilizada para diferentes aplicações e necessitam de características distintas para os equipamentos. Assim como será mostrado a seguir, a comunicação que mais se adequa às circunstâncias necessárias.

As subseções 2.1, 2.2 e 2.3 foram escritas a partir de informações presentes em (1) e (9).

### 2.1 THROUGH-THE-WIRE (TTW)

Neste tipo de comunicação, o sinal é enviado através de cabos coaxiais da superfície até o interior da terra onde há o equipamento utilizado para receber esses dados. Este equipamento, por sua vez, envia a mensagem do interior da terra até a superfície de maneira sem fio. Devido uma parte do sistema ser sem fio (wireless) e a outra com fio então este foi chamado de sistema híbrido ou semi-wireless.

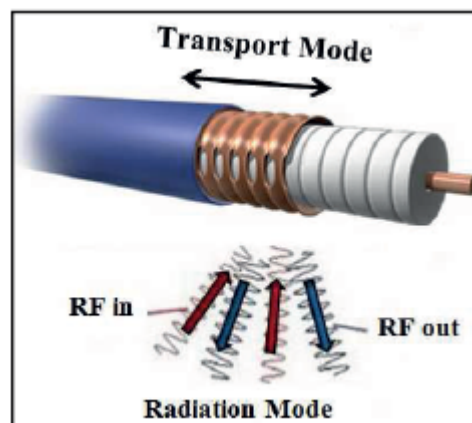


Figura 1 – Exemplo de um cabo utilizado em um sistema de comunicação TTW. Obtido de (1).

No início do desenvolvimento desta tecnologia, o uso deste tipo de comunicação em minas se deu através apenas de observações experimentais (sem o uso de teorias ou construção de modelos empíricos). Com o passar o tempo, foi-se descoberto que sinais de

frequência de 10 MHz poderiam cobrir distâncias menores que 30 metros em uma mina vazia e também que condutores como cabos elétricos sofriam pouca atenuação tendo seu raio de cobertura maior. Na época, este fato não foi totalmente entendido pelos estudiosos porém isso resultou na técnica monofilar no fim da década de 60. A qual foi o princípio desta tecnologia TTW. Com isso, os sinais deste tipo de comunicação são do tipo MF (medium frequency), na faixa de 300 kHz to 3 MHz.

## 2.2 THROUGH-THE-AIR (TTA)

Este tipo de comunicação é um sistema sem fio(wireless) que opera com sinais do tipo SHF (super high frequency), na faixa de 3 to 30 GHz, onde é possível haver comunicação por voz e dados, sendo possível rastrear mineiros e equipamentos e além disso há a possibilidade de controlar remotamente algum equipamento ou receber vídeos das câmeras de segurança.

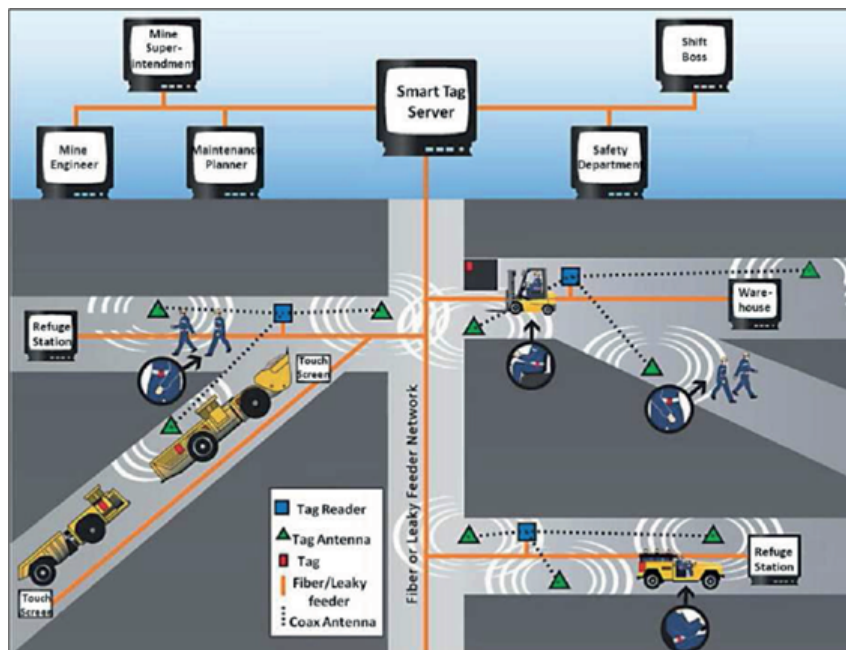


Figura 2 – Exemplo de um sistema de comunicação utilizando a tecnologia TTA. Obtido de (1).

Sua origem mais atual vem do início dos anos 2000. Nessa época, houve um grande avanço em comunicações digitais de curtas distâncias e com isso a indústria de minas começou a acreditar na implementação de tecnologias deste tipo para comunicações de curtas distâncias nas minas. Entretanto, no final da primeira década dos anos 2000, o investimento foi nas tecnologias de baixa taxa de dados como ZigBee e o RFID e nas de alta taxa como o UWB devido ao fato de ambas serem de baixo consumo, curto alcance e com capacidade de rastreamento. Esta tecnologia é utilizada de maneira conjunta com uma

rede WLAN onde é possível, assim, haver a comunicação e o rastreamento em tempo real dos trabalhadores de minas subterrâneas. E assim se desenvolveu este tipo de tecnologia.

Na figura 2, é possível ver a representação de um sistema TTA implementado em uma mina subterrânea e em sua superfície. Assim fica claro que o sistema depende de fios e cabos para a transmissão de seus dados mesmo sendo um sistema de propagação pelo ar. Isso se dá pelo fato de que existem diversos receptores e transmissores dentro da mina conectados tanto com câmeras quanto com outros tipos de equipamentos. Entretanto, estes transmissores e receptores são ligados à superfície através de cabos.

## 2.3 THROUGH-THE-EARTH (TTE)

Neste tipo de comunicação, os sinais são enviados por antenas enormes da superfície da terra até o interior desta através das rochas presentes entre o caminho do sinal. Os sinais enviados são do tipo ELF(extreme low frequency) ou VLF (very low frequency) devido ao fato de que nos sinais de maior frequência ocorre uma grande atenuação no sinal impossibilitando a comunicação de maneira viável. Este tipo de comunicação é ideal para desastres devido ao fato de que não é necessário fios ou grandes equipamentos dentro da mina.

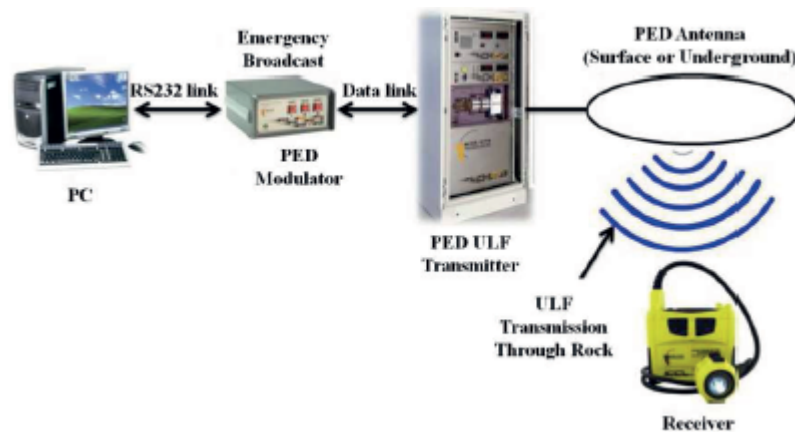


Figura 3 – Representação de um sistema de comunicação TTE. Obtido de (1).

O interesse por comunicação sem fio para minas subterrâneas começou por volta dos anos 1920 com os estudiosos da época realizando pesquisas nas possibilidades da transmissão wireless TTE. Isto continuou até a década de 40 onde o Departamento de Minas dos Estados Unidos começou a comercializar tecnologias como Carrier-current rádios e TTE signaling para comunicações normais e as de operações de emergências nas minas. Porém ao final da década de 40, os estudos de comunicação em túneis foram deixados de lado devido taxa de transmissão baixa e ao pesado e grande equipamento utilizado neste tipo de comunicação. Entretanto, nos tempos atuais estes estudos sobre TTE foram re-

tomados devido as novas tecnologias de sistemas de comunicação disponíveis no mercado onde é possível uma maior área cobertura dentro da mina.

A comunicação TTE é excelente para situações de emergência, onde houve desastre na mina como explosões, inundamento, desabamento, etc. Isto ocorre pois este tipo de comunicação utiliza as rochas como meio de propagação e assim é possível atingir todas as partes da mina e , além disso, não necessita de cabos entre a superfície e o interior da terra. É possível esta comunicação ser “one-way”(apenas ida) que seria apenas da superfície para o interior da mina ou “two-way”(ida e volta) que seria tanto do interior da mina para a superfície como no sentido inverso. O tipo “two-way” é mais utilizado devido ao fato de que em situações de emergência, é importante para obter informações das pessoas presas dentro da mina para facilitar, assim, o resgate deles.

Para casos de emergência são comumente utilizados dois tipos de comunicação baseados em TTE que são: comunicação por texto e rastreamento. Essa comunicação por texto é realizada através do dispositivo pessoal de emergência (Personal-emergency-device – PED) onde é utilizado sinais VLF/ULF para transmitir mensagens de texto. Inicialmente só havia a possibilidade da comunicação ser “one-way”, entretanto atualmente é possível a comunicação “two-way”.

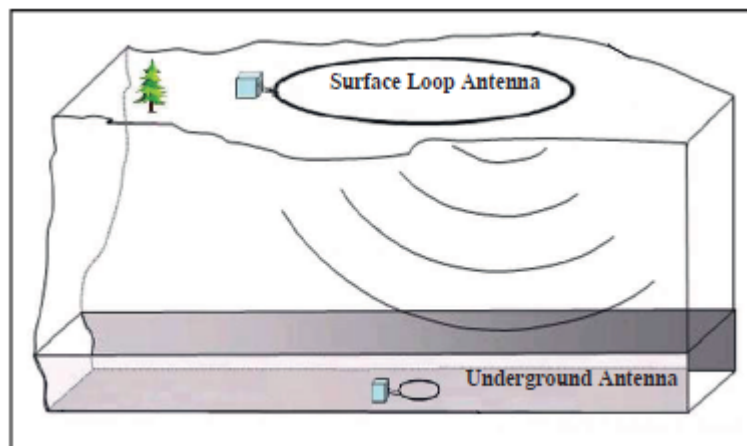


Figura 4 – Ilustração de um sistema TTE. Obtido de (1).

## 3 Sistema de Comunicação Digital

### 3.1 Codificadores de Voz

O processo de codificação de voz realiza a transformação dos fonemas emitidos por uma pessoa em bits, passando basicamente de analógico para digital. Dependendo da região geográfica, existem um número de fonemas pré-determinados como no português do Brasil que possui 44 fonemas, não existindo língua com mais que 64 fonemas. É possível identificar os fonemas com códigos binários de 6 bits porém existem outros fatores que devem ser levados em consideração para a taxa de bit/s como: a duração do fonema, a energia do fonema, a caracterização do orador, entre outros. Existem alguns processos de codificação de voz, com cada um possuindo um tipo de qualidade e foco diferente, que são: codificadores em forma de onda, codificadores paramétricos e codificadores híbridos ou também chamados de vocoders (11),(12).

Os codificadores de forma de onda tentam reproduzir amostra por amostra dos fonemas recebidos explorando características estatísticas, temporais ou espectrais. Este tipo de codificador possuem baixa complexidade de implementação e baixo atraso porém requerem uma alta taxa de transmissão ( maior que 16kbits/s). A codificação é realizada de tal modo que a quantização é feita sobre a forma de onda do sinal voz e há a possibilidade de ser trabalhar tanto no domínio da frequência como no do tempo (11),(12).

Os codificadores paramétricos, ou também chamados vocoders, representam um conjunto de parâmetros com uma atualização periódica. O sinal de voz é segmentado em diversos intervalos periódicos denominados quadros. Essa atualização ocorre a cada quadro. Este tipo de codificador possui complexidade de implementação e atraso elevados além do fato da voz soar sintética, porém a taxa de transmissão é baixa (menor que 4,8kbit/s) (11),(12).

Os codificadores híbridos combinam as características de qualidade dos codificadores de forma de onda com as características de eficiência dos codificadores paramétricos. Este tipo de codificador se baseia nos modelos de produção de voz e utilizam um tipo mais preciso de apurador para ser possível a melhoria da qualidade da voz. Possuem um grau elevado de complexidade mas conseguem uma qualidade superior aos dos codificadores de forma de onda com taxas menores (entre 4 kbit/s e 16kbit/s) (11),(12).

O G723.1 é um tipo de codificador paramétrico utilizado para compressão de áudios em uma taxa baixa de bit/s. Neste codificador, há duas taxas de bit associadas (5,3 kbit/s e 6,3 kbit/s). A taxa maior possuiu uma melhor qualidade porém a de menor taxa possui uma qualidade satisfatória e uma maior flexibilidade. Neste código, existem essas duas

taxas tanto no codificador como no decodificador. Este codificador tem maior eficiência na codificação de sinais de fala, porém podem ser utilizados em sinais de músicas e outros tipos (2).

Este codificador foi projetado para operar utilizando sinal digital obtido a partir de um sinal analógico com uma taxa de amostragem de 8 kHz e convertido em um PCM 16 bits. O decodificador converte o sinal novamente para analógico de uma maneira análoga ao decodificador (2).

A seguir, há uma figura exemplificando os blocos de funcionamento do codificador G723.1. Para mais informações, é necessário consultar (2).

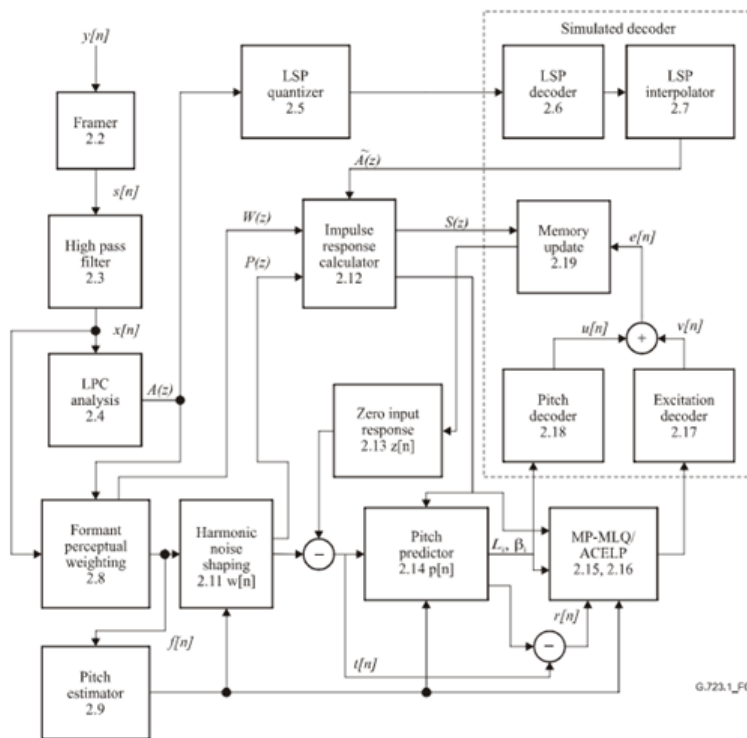


Figura 5 – Representação em blocos de um codificador G723.1. Obtido de (2).

Devido a larga restrição de banda existente na comunicação TTE e a alta atenuação existente no meio de propagação, serão utilizados codificadores paramétricos. Além disso, como o atraso e o fato da voz não ser fielmente reproduzida na saída não serem fatores importantes neste caso e sim a taxa de transmissão então este tipo de codificador foi o escolhido.

### 3.2 Códigos Corretores de Erro

Para ser alcançada a comunicação digital com o mínimo de erro possível na presença de canais com distorções, ruídos e interferências é necessário adicionar a presença



de redundância apropriada aos bits da informação a ser enviada. Como exemplo disso é possível citar os bits de paridade que são para a detecção de um número ímpar de erros. Neste trabalho, serão utilizados códigos corretores de erro, com o objetivo principal de diminuir a probabilidade de erro na recepção. (12)

Os códigos corretores de erro de bit tiveram seu início a partir da pesquisa de Shannon, publicado em 1948, sobre o limite da capacidade do canal de comunicação. Com isso, houve muitos estudos entre a década de 50 e a de 70 sobre codificação de erro de bits com essa ideia se popularizando a partir de 1970 devido a corrida espacial e a evolução dos computadores. Atualmente, esta tecnologia está presente em diversos itens presentes na vida das pessoas como no telefone, na televisão, na Internet, etc. (13)

Um dos primeiros códigos foi projetado por Hamming em 1950 ficando conhecido como códigos de Hamming. Estes utilizavam o processo de verificação de bit a bit sendo necessário adicionar bits de redundância e com isso foram surgindo vários tipos de códigos. Atualmente existe uma grande quantidade de códigos corretores sendo os mais importantes divididos em 4 categorias: códigos de blocos lineares, códigos cíclicos, códigos convolucionais e códigos turbo. (13)

Os códigos de blocos lineares se baseiam na premissa de codificar um bloco de  $K$  bits em um outro de  $n$  bits sendo  $n > K$ . Esses bits a mais são os de redundância, os quais são denominados dígitos de verificação de paridade.

Os códigos cíclicos, por sua vez, são uma subclasse dos códigos de blocos lineares. Estes códigos são baseados na utilização de polinômios para representação dos símbolos. As palavras de códigos são simples deslocamentos laterais da informação original. Devido a este motivo, é possível a implementação de códigos de ordem mais altos que nos códigos lineares. Além disso, há a vantagem destes códigos possuírem uma estrutura de código bem definida facilitando, assim, a codificação.

Os códigos convolucionais diferem dos códigos de bloco devido ao fato de que nos convolucionais os  $n$  bits que serão formados no codificador dependem dos  $k$  bits de informação original daquele momento e de momentos anteriores. Enquanto isso, nos blocos lineares há a dependência apenas dos  $k$  bits de informação original daquele momento específico. Além disso, o tamanho dos  $k$  bits da informação e os  $n$  bits do código gerados são, geralmente, pequenos. Por fim, a vantagem deste tipo é a de ser de fácil implementação pois podem ser realizadas por meio de registradores de deslocamentos.

O código Turbo é uma técnica desenvolvida onde o desempenho na correção de erros é melhor quando comparado com os outros tipos de códigos. Este é uma das maiores inovações na teoria dos códigos corretores de erro dos últimos tempos. Este código se baseia na codificação e decodificação iterativa. O propósito deste código é uma maior diminuição do SNR (relação sinal-ruído) e um maior ganho na codificação.

O código Bose-Chaudhuri-Hocquenghen (BCH) é baseado nos códigos cíclicos e, por sua vez, é um dos tipos mais estudados atualmente. Um dos motivos é pelo fato de que sua decodificação pode ser implementado com uma certa simplicidade. Sua descrição é dada da seguinte forma: há um código  $(n,k)$  que corrigirá  $t$  erros, com  $n = 2^m - 1$  e  $n - k \leq mt$  (sendo  $m$  e  $t$  números positivos). A distância mínima entre as palavras de código deve ser contida no seguinte intervalo:  $2t + 1 \leq d_{min} \leq 2t + 2$ .

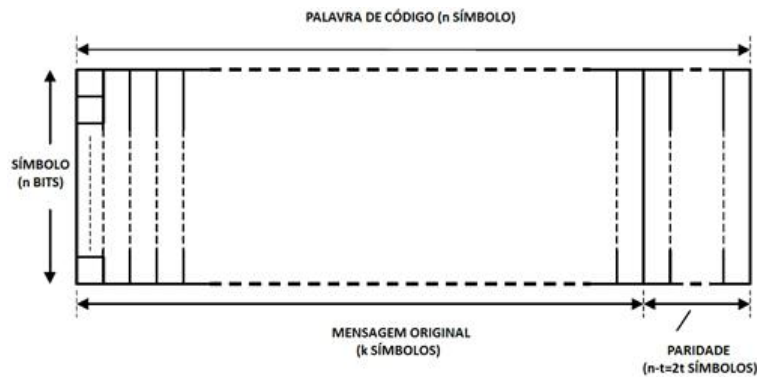


Figura 6 – Definições dos principais pontos do código Reed Solomon. Obtido de (3).

Um caso especial do código BCH não binários são os códigos de Reed-Solomon, os quais são os mais bem sucedidos e utilizados em diversas aplicações do dia a dia atualmente. Dentre suas aplicações, é possível citar a armazenagem digital (CD e DVD), modems de alta velocidade, HDTV, etc. Este código foi inventado no ano de 1960 por Irving S. Reed e Gustave Solomon, consistindo em uma técnica de adição de redundância no sinal com o intuito que o receptor consiga detectar e corrigir erros que venham a ocorrer durante a transmissão. Este tipo de código corretor de erro possui uma boa relação entre eficiência (quantidade de redundância requerida) e complexidade (dificuldade na codificação e decodificação).

### 3.3 Modulação do Sinal

A transmissão e recepção de um sinal é uma operação complexa, que envolve algumas etapas para o sucesso da mesma e pode se tratar de inúmeras possibilidades e cenários principalmente quando está se mexendo com um sistema sem fio. Uma parte fundamental do processo de transmissão de dados é a modulação do sinal para envio. Esta é uma técnica onde as características da portadora são modificadas com o intuito de transmitir as informações, podendo ser a frequência, amplitude ou fase assim como mostrado na figura 7.

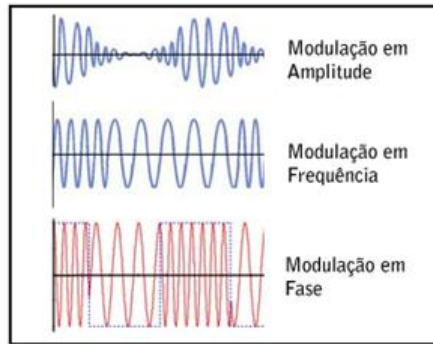


Figura 7 – Exemplos de sinais modulados. Obtido de (4)

Na figura 8, é possível ver uma tabela resumindo dentre os principais tipos de modulação juntamente com suas características.

Portadora Informação	Analogica	Digital
Analogica	<b>MODULAÇÕES ANALÓGICAS</b> – Amplitude ( $A_c$ ): AM – Frequência ( $f_c$ ): FM – Fase ( $\phi$ ): PM	<b>MODULAÇÕES DE PULSO</b> – Amplitude (A): PAM – Largura ( $\sigma$ ): PWM – Posição: PPM – PCM
Digital	<b>MODULAÇÕES DIGITAIS</b> – Amplitude ( $A_c$ ): ASK – Frequência ( $f_c$ ): FSK – Fase ( $\phi$ ): PSK – Quadratura: QAM (= ASK+PSK)	– Códigos de Linha (Não há modulação neste caso)

Figura 8 – Tabela mostrando os tipos gerais de modulação e sua classificação

Dentre os diversos tipos de modulação existentes, será dado enfoque nas modulações PSK e OFDM os quais foram utilizados na construção do simulador.

### 3.3.1 Modulação PSK

A modulação PSK, ou Phase Shift Keying, é uma das grandes classes de modulação digital sendo este tipo de modulação se baseando na mudança de fase. Esta consiste na utilização de alguns sinais com a diferentes fases para representar os diferentes tipos de símbolo, com estes tendo tamanhos de 1 ou mais bits. Existem inúmeras possíveis ordens de modulação PSK, como 2 PSK, 4 PSK, 8 PSK, etc. Estes números representam a ordem da modulação, ou seja, a quantidade de diferentes sinais é possível formar para representar cada símbolo. (5) e (12)

Como exemplo, será analisado um importante e simples caso desta modulação que é a 2 PSK (BPSK), ou também chamada de modulação PSK binária. Esta utiliza apenas um bit por símbolo, ou seja há apenas dois tipos diferentes de símbolos que esta pode

modular. Isto significa que os dados serão representados apenas por dois sinais com fases diferentes. É possível observar a exemplificação destes sinais na equação a seguir e na figura 9. Através desta figura, é possível observar a constelação do tipo BPSK, onde é mostrado os dois sinais possíveis para ser utilizado neste caso, pois só há a utilização de um bit por símbolo. (5) e (12)

$$s_1 = A\cos(2\pi fct), 0 \leq t \leq T \text{ para } 1$$

$$s_2 = -A\cos(2\pi fct), 0 \leq t \leq T \text{ para } 0$$

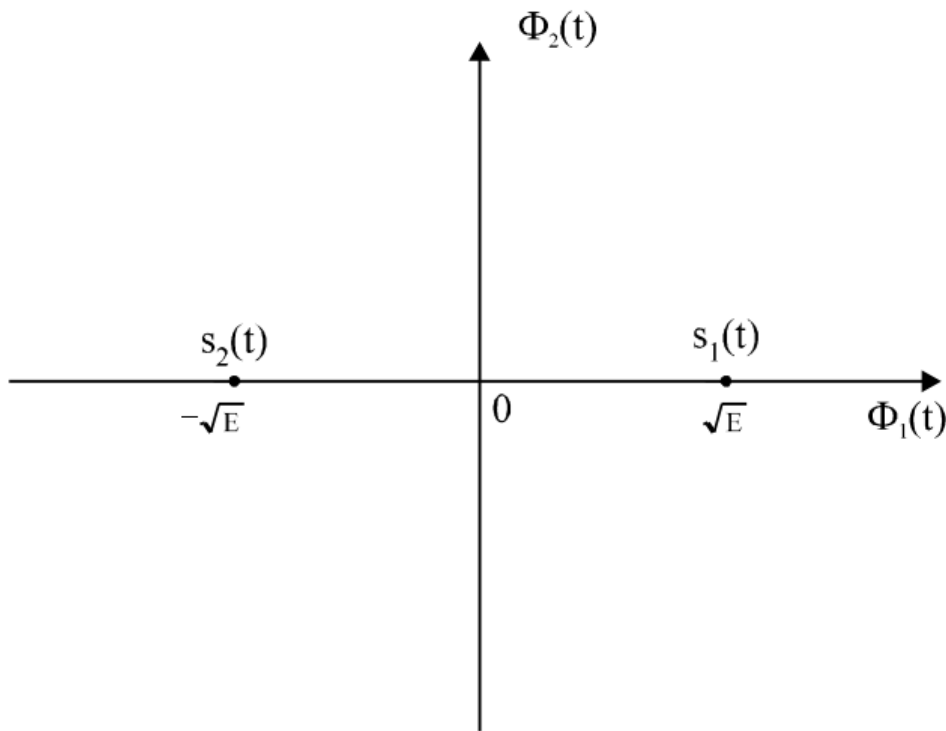


Figura 9 – Constelação da modulação BPSK. Obtida de (5)

### 3.3.2 Modulação OFDM

O FDM é uma técnica de modulação na qual é possível haver a transmissão de vários sinais em um mesmo canal. Neste caso, a banda do sinal é dividida em um número  $N$  de sub canais sem sobreposição. Cada um destes sinais são modulados em uma subportadora diferente (com frequências também diferentes). Com isso, cada parte é modulada e transmitida separadamente. No receptor, o processo de demodulação é realizado individualmente com cada sinal utilizando uma subportadora diferente com o intuito de chegar aos sinais em bandas bases originais. Esta técnica evita a sobreposição dos canais evitando, assim, a interferência entre estes. Isso, porém, acaba sendo um uso ineficiente da banda disponível.(6)

O OFDM é uma técnica de modulação do sinal utilizando a ideia de multiplexação por divisão de frequência. Esta técnica foi desenvolvida na década de 60 e 70 devido a pesquisas para a diminuição da interferência do ruído entre canais que estavam em frequências próximas. A ideia básica é a utilização de diversas sub portadoras em diferentes frequências com uma banda mais estreita ao invés da utilização de apenas uma portadora com uma banda mais larga para enviar informações. Neste caso, diferentemente da FDM, há a sobreposição dos subcanais. Além disso, a modulação e a demodulação do OFDM são realizadas geralmente utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Existem diversas vantagens na utilização do OFDM como o fato de se obter um sinal com grande resistência à interferência, eficiente quando lida com multipercurso, elevada eficiência espectral e minimização do crosstalk. (14)

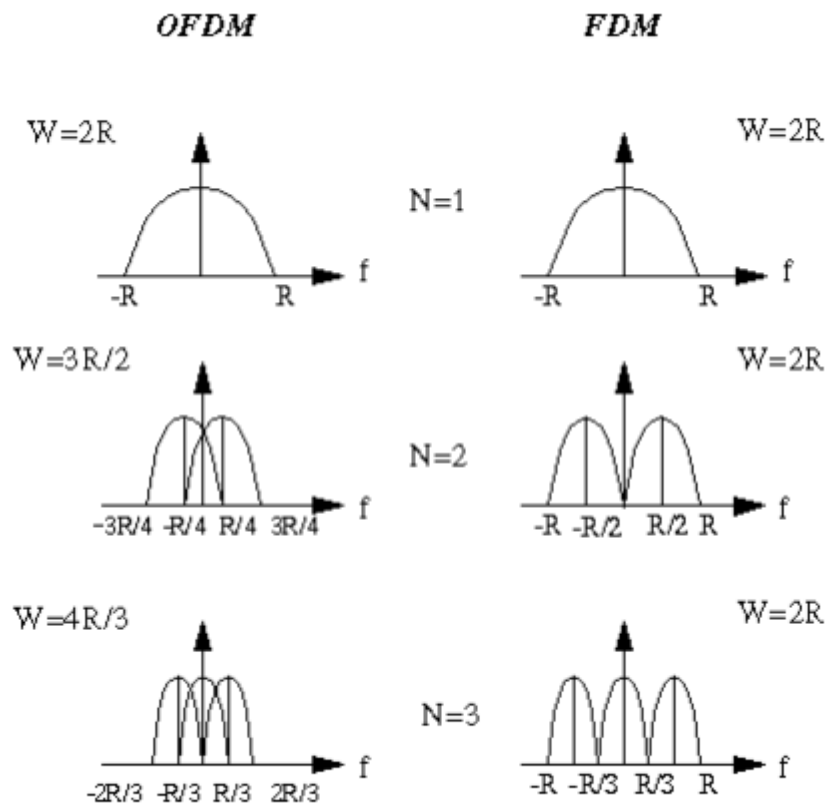


Figura 10 – Comparação entre a modulação OFDM e FDM. Obtido de (6).

O OFDM é um caso especial de transmissão de multiportadoras onde uma informação é transmitida com o uso de um número  $N$  de subportadoras onde há a interposição das bandas assim como mostrado nas figuras acima que são transmitidas. O OFDM pode ser considerado tanto uma técnica de modulação como uma técnica de multiplexação. Com ela é possível aumentar a robustez do sistema contra interferências e desvanecimento seletivo (selective fading). (6)

Se houver a comparação de um sistema com uma portadora e um outro com múltiplas portadoras, é possível observar que, além das vantagens citadas anteriormente, se no caso de uma portadora houver alguma interferência então toda a mensagem pode ser perdida enquanto que no caso de várias portadoras apenas uma porcentagem destas será afetada sendo parte da mensagem salva.

Esta tecnologia possuiu um elevado grau de complexidade para sua implementação, porém é largamente utilizada na área de telecomunicações, sendo utilizado a eletrônica digital para facilitar a codificação e decodificação dos sinais. São implementados em diversos tipos de sistemas como em serviços de broadcast de áudio digital na Europa e em redes de computadores.

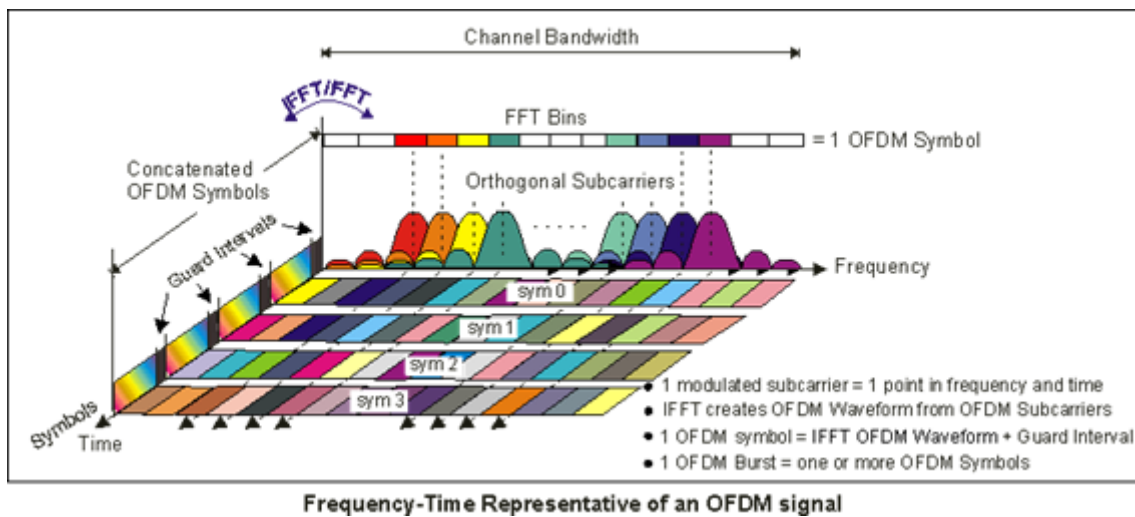


Figura 11 – Representação na frequência e no tempo de um sinal OFDM. Obtido de (7)

### 3.4 Ferramenta de Simulação

Esta seção foi baseada em (15) e (16). O MATLAB é um software que utiliza linguagem de alto nível para programação e possui função de cálculos numéricos computacionais. Foi desenvolvido pela MathWorks e a partir deste programa é possível analisar dados provenientes de arquivos, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicações. É possível chegar a soluções para as análises realizadas neste programa utilizando uma linguagem de programação adaptada de C/C++. É um programa muito utilizado, sendo os clientes provenientes das áreas de engenharia, ciência e economia. Geralmente, é utilizado em empresas industriais, meios acadêmicos (como faculdades) e em instituições de pesquisa. Este integra cálculos matemáticos computacionais, ferramentas de visualização e uma poderosa linguagem para uma computação técnica. Além disso, o fato de possuir uma arquitetura aberta facilita a criação de novos algoritmos e de novas ferramentas. Este software pode ser utilizado interativamente e possuiu uma quantidade de funções para as

mais diversas finalidades como funções para telecomunicações, facilitando assim a tarefa de programar. Na parte computacional, este software é considerado uma ferramenta muito poderosa para resolução de problemas numéricos de engenharia.

O MATLAB possui uma linguagem de fácil utilização tanto para expressar os problemas como para suas soluções (tanto matematicamente como visualmente). Os usos típicos deste programa computacional são:

- Desenvolvimento de algoritmos e cálculos numéricos;
- Simulação;
- Geração de gráficos de diversos tipos como de engenharia;
- Processamento de sinais;

Portanto, foi decidido que este seria o programa no qual este trabalho iria ser realizado. Para os devidos fins deste trabalho, foi utilizado a versão 2015a para a implementação deste trabalho. Nesta versão, houve algumas melhoras em relação às anteriores como a criação de novas funções que foram úteis a este trabalho. Muitas funções já existiam nas versões anteriores, as quais foram fundamentais para o funcionamento deste simulador.





## 4 Descrição do Simulador

### 4.1 Caracterização geral do Sistema

Implementou-se um sistema onde será integrado toda a teoria explicada neste trabalho. A ideia geral é montar um sistema de simulação de uma comunicação TTE onde haverá alguns blocos para a parte do emissor e outros para a parte do receptor. O sistema conterá os seguintes blocos:

Transmissor:

- Codificador de Voz Paramétrico;
- Codificação de Canal (Código Corretor de Erro);
- Modulação do Sinal.

Receptor:

- Demodulação do Sinal;
- Decodificação de Canal;
- Decodificador Paramétrico.

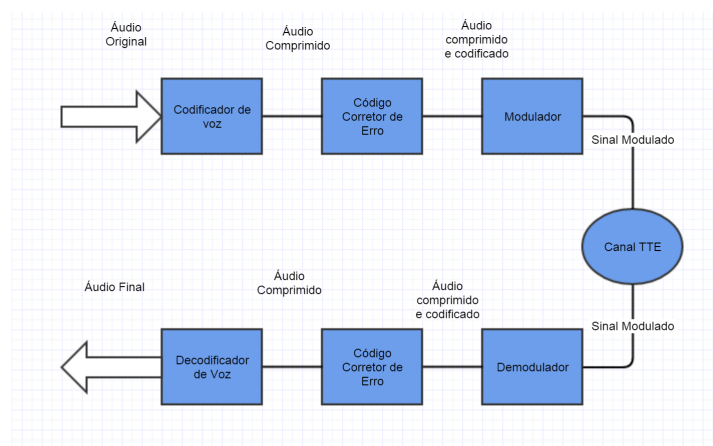


Figura 12 – Representação do sistema completo em diagrama de blocos.

Algumas observações sobre detalhes destes blocos: na codificação de canal, optou-se pela codificação Reed-Solomon. Isso foi definido devido a sua facilidade de implementação em hardware em relação a outros códigos de bloco. Além disso, no bloco de Modulação

e Demodulação do sinal, foi escolhida a modulação OFDM com cada portadora sendo modulada por PSK (QPhase Shift Keying o qual significa, em português, uma modulação pela alteração da fase do sinal) e PAM (Pulse Amplitude Modulation, que, em português, significa modulação por código de pulso). É possível, pela teoria, modular cada portadora por um tipo de modulação diferente, porém neste programa foi utilizado a mesma modulação para todas. Esta seria uma implementação para um trabalho futuro a partir deste projeto. Além disso, entre o codificador e decodificador, há o canal TTE e a adição de ruído TTE. Entre esses blocos, há um canal que foi obtido a partir da literatura já existente que trata a respeito deste assunto. Assim como é possível ver na Figura 13, o gráfico deve ser do tipo intensidade do campo magnético ou intensidade do sinal pela frequência. Neste tipo de ambiente, o resultado, o qual é dado por um gráfico, mostra a intensidade do sinal diminuindo à medida que a frequência do sinal aumenta. Por este motivo, que é necessário um sinal com frequência baixa (na faixa dos 10 kHz) e assim é necessário os codificadores de voz e códigos coletores de erro com a menor taxa de bit/s.

As figuras 13 e 14 mostram exemplos de curvas representando o canal TTE para diferentes profundidades. É possível ver o canal atenua sinais de frequências mais altas, sendo necessário a modulação em frequências na ordem de kHz.

Estas figuras, que foram obtidas a partir de medições e estudos em minas subterrâneas mostra o comportamento do canal para diferentes profundidades. É possível observar que o sinal é mais atenuado quanto mais profundo for a mina, assim como quanto mais alto for a frequência do sinal. Sendo assim, a frequência do sinal se torna algo vital para acontecer a comunicação digital entre a superfície e o interior da mina.

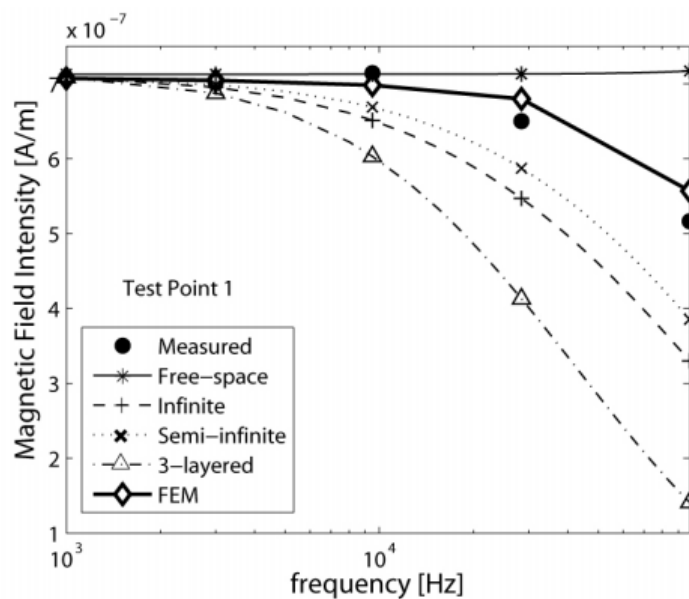


Figura 13 – Exemplo de figura que será usada para modelagem do canal sendo neste caso a profundidade de 29 metros. Obtido de (8).

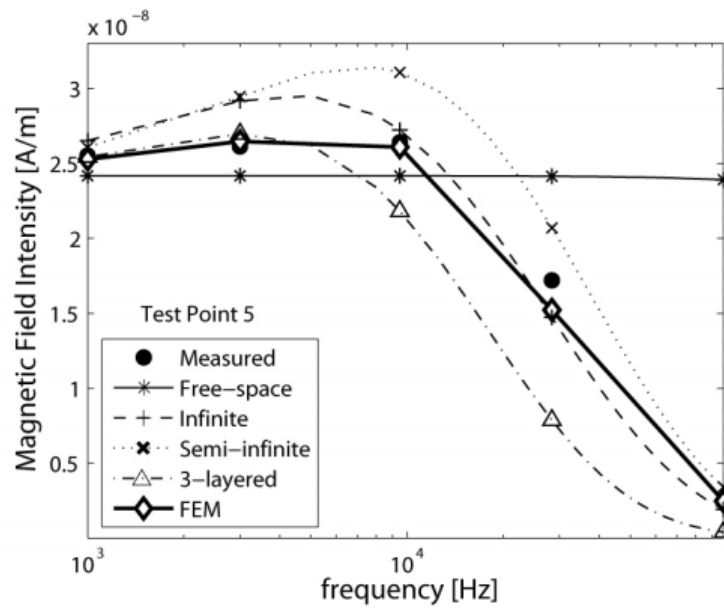


Figura 14 – Exemplo de figura que será usada para modelagem do canal sendo neste caso a profundidade de 146.7 metros. Obtido de (8).

## 4.2 Caracterização dos Blocos do Sistema

### 4.2.1 Bloco de Entrada e Saída

Neste simulador, foram realizadas duas possibilidades para este caso: realizar gravação de áudio e, com isso, utiliza-los no programa ou utilizar dados aleatórios. Ambos os casos são válidos, porém os dados aleatórios são úteis para a realização de testes com o programa pois possuem uma quantidade de bits que é definida pelo usuário.

Como aplicação prática, o primeiro bloco deste simulador pode ser utilizado ser um codificador de voz, a partir da gravação do áudio no momento que o código iniciou a funcionar. A partir da norma da ITU-T G723.1 foi criado, por integrantes do departamento de engenharia Elétrica e da Computação da Universidade McGill, um codificador e decodificador de voz o qual, como explicado anteriormente neste trabalho, realiza esse processo a uma taxa baixa de kbits/s. Portanto, a partir do código fornecido por essa faculdade foi possível aplicar este no simulador como uma “caixa preta”, ou seja, apenas uma função onde foi possível entrar com os dados do áudio e obter os dados codificados no caso do codificador e obter o áudio a partir de dados codificados no caso do decodificador.

O áudio de entrada do codificador precisa ser um arquivo de fala com uma taxa de amostragem de 8kHz e mono, ou seja, apenas um canal. São aceitos arquivos em alguns diferentes formatos como: WAVE, raw, AU e Sphere. Entretanto, neste simulador foram utilizados apenas arquivos WAVE. A saída deste codificador pode ser em dois formatos: um arquivo de bitstream ou um arquivo de dados do MATLAB. Assim, como no caso da

entrada, foi escolhido apenas uma destas opções que foi um arquivo bitstream.

No caso do decodificador, é, logicamente, realizado exatamente a operação inversa à realizada pelo codificador. Portanto o arquivo de entrada seria um bitstream ou um arquivo Matlab. Contudo, a saída deste bloco se dá apenas por um arquivo WAVE.

#### 4.2.2 Bloco do Código Corretor de Erro

A adição da redundância, assim como explicado anteriormente neste trabalho, é algo fundamental para a implementação deste simulador e, portanto, para manter uma taxa de erro de bit baixo. Dentre as inúmeros tipos de códigos corretores de erro, foi escolhido o de Reed Solomon, o qual é um dos mais utilizados atualmente em diversos setores, assim como explicado anteriormente neste TCC.

Para a implementação deste tipo de codificação foi utilizado um dos artifícios do software MATLAB, o qual possui ferramentas e funções para a área de Telecomunicações. Há duas maneiras de realizar esta codificação no MATLAB:

- Através da função “rsenc(msg,n,k)”, a qual utiliza como entrada um vetor “Galois” que representa a entrada e números inteiros “n” e “k” que representam o comprimento da palavra código;
- Através da criação do objeto “comm.RSEncoder”, o qual tem a função por definir as características do codificador Reed Solomon como o tamanho da palavra código e da mensagem além de ser possível definir o tipo de entrada que será aceita neste codificador, como variáveis do tipo binário ou decimal. Para aplicação deste código corretor de erro definido, é necessário a utilização da função “step”, a qual recebe um vetor de dados e utiliza o codificador com as características definidas no objeto explicado anteriormente.

Esta função, tem como objetivo a Neste programa, foi utilizado a aplicação do Código Corretor de erro Reed Solomon. Isso foi devido a alguns fatos como: a função explicada no item 1 está ficando ultrapassada e será retirada do MATLAB nas próximas versões, e este simulador foi construído com o intuito de poder ser modificado e continuado no futuro; Há muito mais flexibilidade nas escolha dos parâmetros utilizando objeto (item 2).

No caso do decodificador, há duas opções assim como no codificador às quais são basicamente o inverso das opções citadas nos item um e dois. Estas são:

- Através da função “rsdec”, a qual utiliza como entrada um vetor “Galois” que representa a entrada e números inteiros que representam o comprimento da palavra código;

- Através da criação do objeto “comm.RSDecoder”, o qual tem a função por definir as características do codificador Reed Solomon como o tamanho da palavra código e da mensagem além de ser possível definir o tipo de entrada que será aceita neste decodificador, como variáveis do tipo binário ou decimal. Para aplicação deste código corretor de erro definido, é necessário a utilização da função “step”, a qual recebe um vetor de dados e utiliza o decodificador com as características definidas no objeto explicado anteriormente.

Foi adicionado a opção da não realização da codificação Reed Solomon, a qual pode ser utilizado para comparações entre desempenho de sistemas de comunicação. No próximo capítulo será mostrado com mais detalhe a diferença de eficiência na utilização de código corretores de erro.

### 4.2.3 BLoco da Modulação e Demodulação

Como forma de modulação foi escolhida a opção de ser OFDM, a qual foi explicada em capítulos anteriores deste trabalho. Esta parte, computacionalmente, foi dividida em duas etapas:

1. Passar os dados de serial para paralelos e realizar a modulação das portadoras utilizando PSK ou PAM;
2. A realização da segunda parte da OFDM, a qual é a realização da FFT e consequentemente da transmissão dos dados. Isso se deu através utilização da função da parte de Telecomunicações presente no MATLAB "comm.OFDMModulator" e "comm.OFDMDemodulator", onde é possível determinar diversos parâmetros como o número de subportadoras, número de dados esperados, prefixos cíclicos, número de antenas, entre outros.

Este processo realizou basicamente os passos realizados quando se deseja modular através de OFDM. Primeiramente, os dados seriais foram divididos em portadoras, ou seja, foram paralelizados. Após isto, ocorreu a modulação dos dados que estavam dispostos de forma paralela de acordo com o número de portadoras (neste programa, todas foram moduladas com o mesmo tipo de modulação que no caso foi a PSK). Para finalizar foi realizado o IFFT e assim passando os dados para a forma serial.

Para demodular, foi necessário apenas realizar o processo inverso.

### 4.3 Bloco do Canal e Ruído TTE

Esta parte do programa, é a que define este como um sistema específico para a comunicação TTE em minas. A partir de medidas experimentais e dados obtidos pela literatura específica deste assunto, os canais e ruídos TTE foram construídos e fornecidos por integrantes de (17) e (18). O canal utilizado ficou similar aos representados pelas figuras 13 e 14, principalmente com o fato de que o sinal é atenuado a medida que a frequência aumenta. Assim como é possível ver no código deste canal, existem diversos parâmetros já pré-determinados como a profundidade.

Para diminuir ou acabar a influência do canal na transmissão dos dados, foi utilizado um equalizador através de um filtro Adaptativo RLS e LMS, há a opção no simulador para escolher a desejada. Além disso, é possível definir a ordem filtro assim como o fator de esquecimento ou o tamanho do passo, dependendo do tipo de algoritmo utilizado. Na parte dos resultados, isto será mostrado com mais detalhes.

Além disso, foi criada a opção da utilização de ruído branco e da não utilização de um canal. Isso é importante para a análise dos resultados pois é possível analisar a diferença entre os efeitos dos dois tipos de ruído, assim como obter curvas teóricas utilizando o fato de não usar um canal para afetar o sinal.

Em todos os casos, o valor do SNR (Razão Sinal-Ruído), ou seja, a divisão entre a potência do sinal foi calculado com base em três fatores: a influência do código corretor de erro, o valor de  $E_b/N_0$  (medida realizada no receptor que serve para indicar a intensidade do sinal, o qual as curvas do resultado terão como referência) e a ordem da modulação.

Por fim, são calculados os valores das taxa de erro de bit para uma faixa específica de valores de  $E_b/N_0$  para gerar os gráficos que serão mostrados no capítulo dos resultados.

## 5 Resultados

### 5.1 Validação

Nesta seção, será realizado algumas comparações entre curvas geradas pelo sistema construído e as curvas teóricas. Isso foi realizado com o intuito apenas da validação do simulador, ou seja, comparar os resultados gerados com os teóricos. Com isso, será possível confirmar a veracidade e confiabilidade do simulador com os resultados gerados para o ambiente TTE.

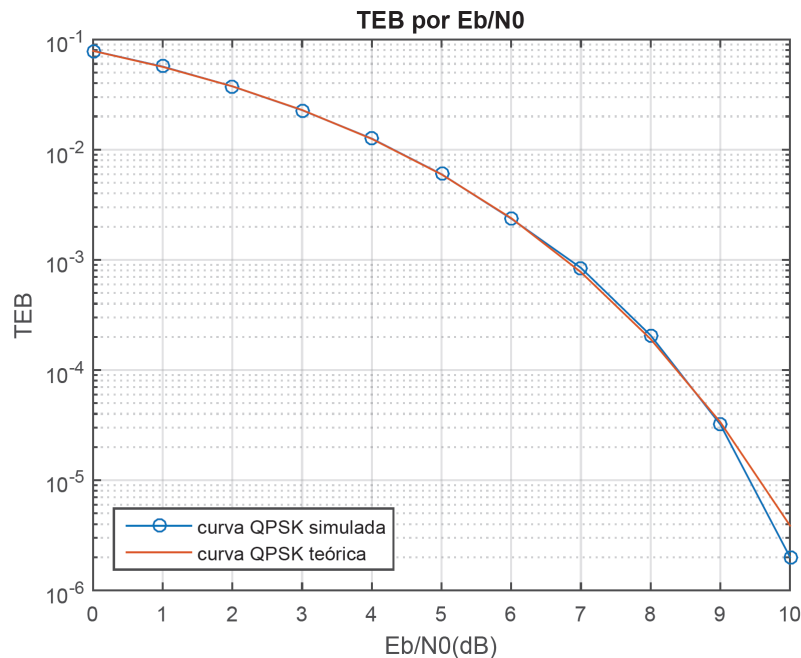


Figura 15 – Validação do simulador pela comparação entre curvas  $E_b/N_0$  por TEB utilizando a modulação QPSK.

As figuras 15, 16 e 17 mostram a comparação entre dois tipos de gráficos: o teórico, gerado pela função "bertool" do MATLAB, e o gerado pelo simulador. A figura 15 mostra uma simulação gerada pelo MATLAB para 4-PSK, com ruído branco, sem codificador e sem canal e o outro mostrando um gráfico gerado pelo simulador construído neste trabalho possuindo as mesmas características do primeiro. Da mesma forma ocorre com a figura 16 e 17 porém mudando apenas o fato de que foram utilizados a modulação BPSK e a 8-PSK, respectivamente. Analisando os gráficos, é possível observar que possuem a mesma forma, ou seja, são praticamente iguais. Portanto, temos que este simulador está correspondendo com a teoria. Em todos os casos analisados, os resultados estão coerentes com a teoria.

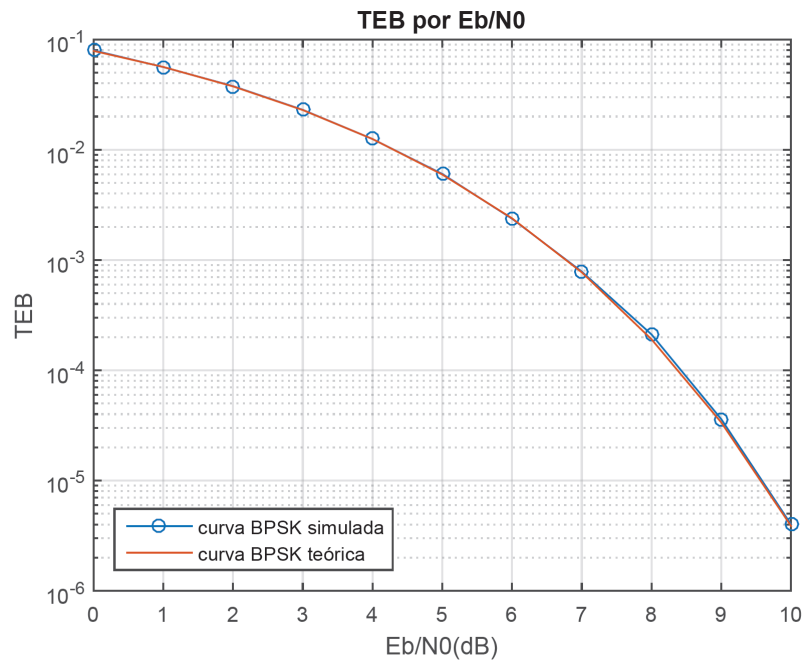


Figura 16 – Validação do simulador pela comparação entre curvas  $E_b/N_0$  por TEB utilizando a modulação BPSK.

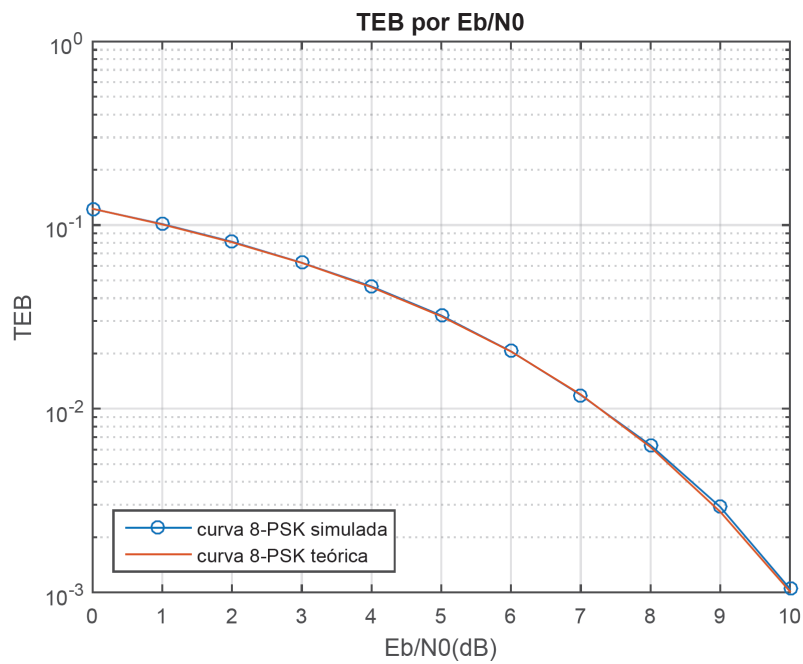


Figura 17 – Validação do simulador pela comparação entre curvas  $E_b/N_0$  por TEB utilizando a modulação 8-PSK.



## 5.2 Análise de Resultados

Neste simulador, há um grande número de opções de escolha para a simulador de transmissão de dados como: a ordem da modulação (o número de símbolos possíveis com uma quantidade determinada de bits), o tipo de ruído ( ruído TTE, ruído branco e sem ruído), codificação de canal(Reed Solomon ou desligado), tipo de canal (canal TTE ou sem canal), número de subportadoras (quando a modulação OFDM é utilizada), o tipo de dado de entrada (dados aleatórios ou dados de uma gravação de áudio), dentre outros.

Nas seções a seguir serão analisados alguns destes casos através da comparação entre eles.

### 5.2.1 Análise tipos de ruídos

Nesta seção, será analisado o comportamento, na curva TER por  $E_b/N_0$ , para o caso da influência dos ruídos. Para este caso, foram geradas três curvas onde uma está representando o caso onde não há ruído, a outra o caso com ruído branco e, por último, o caso onde há ruído TTE.

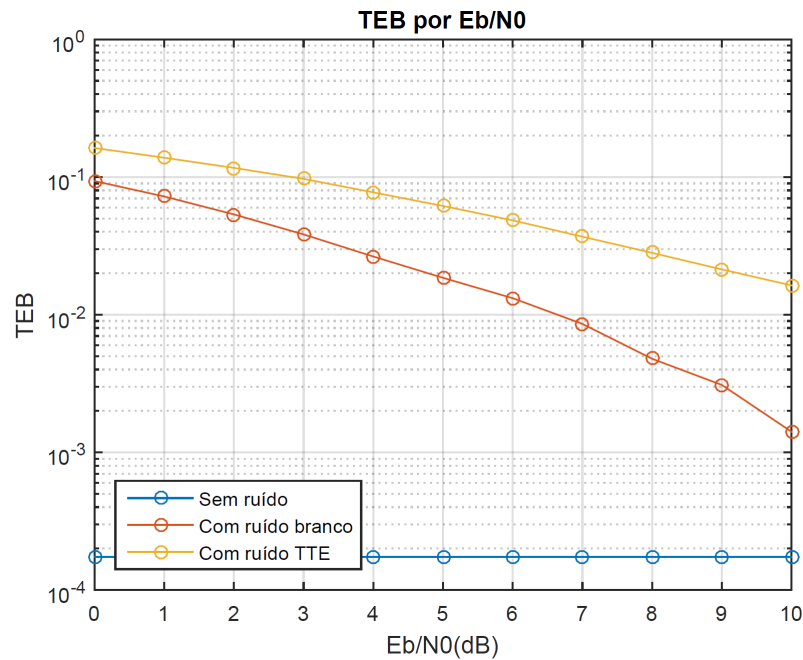


Figura 18 – Curvas  $E_b/N_0$  por TER para os três diferentes casos de ruídos do simulador.

Após observar o gráfico da figura 18, é possível ver que este faz total sentido. No caso onde não há ruído, o valor do ruído será 0 e então o valor do TER só sofrerá influência do canal sendo um valor baixo e praticamente constante. Por outro lado, o ruído branco afeta no valor de TER mas não tanto quanto o ruído TTE. A razão disto é o fato dos receptores digitais estarem mais adaptados para trabalhar com ruído branco

do que com ruído TTE, que é algo específico pois está presente apenas em ambientes de minas terrestres.

### 5.2.2 Presença do Canal TTE

Nesta seção, será analisado o comportamento no caso da utilização ou não do canal TTE. Para isto foram geradas duas curvas no mesmo gráfico, onde é possível observar a diferença entre ambas.

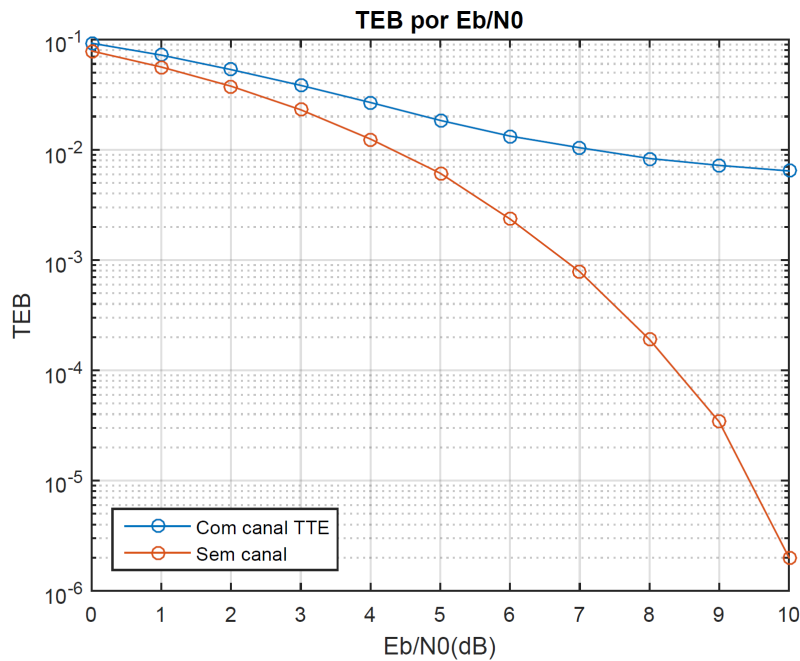


Figura 19 – Curvas  $E_b/N_0$  por TEB para um sistema com canal TTE e outro sem canal.

A partir da análise do gráfico 19, é possível notar como a presença do canal TTE diminui a eficiência do sistema de comunicação. Sua taxa de erro de bit aumenta consideravelmente comparado com um sistema que não possui canal, à medida que o número  $E_b/N_0$  aumenta.

É interessante notar que a taxa de erro de bit aumenta consideravelmente mesmo com a utilização de um equalizador através de um filtro adaptativo. Isso se dá pelo fato da equalização realizada ajudar a diminuir a influência do canal, mas não a tirar completamente. Na próxima seção, será discutida sobre o tema da equalização e mostrada que a mesma realmente é fundamental para o bom funcionamento do sistema de comunicação.

### 5.2.3 Equalização

Nesta seção, será mostrado a importância do uso do equalizador para diminuir o efeito do canal, assim como verificado o efeito da mudança do tipo de algoritmo do filtro

adaptativo (entre RLS e LMS). Para este item, foram geradas duas curvas onde uma utilizava o equalizador com o algoritmo RLS com o fator de esquecimento igual a 0.9 e a outra estava sem o uso do equalizador.

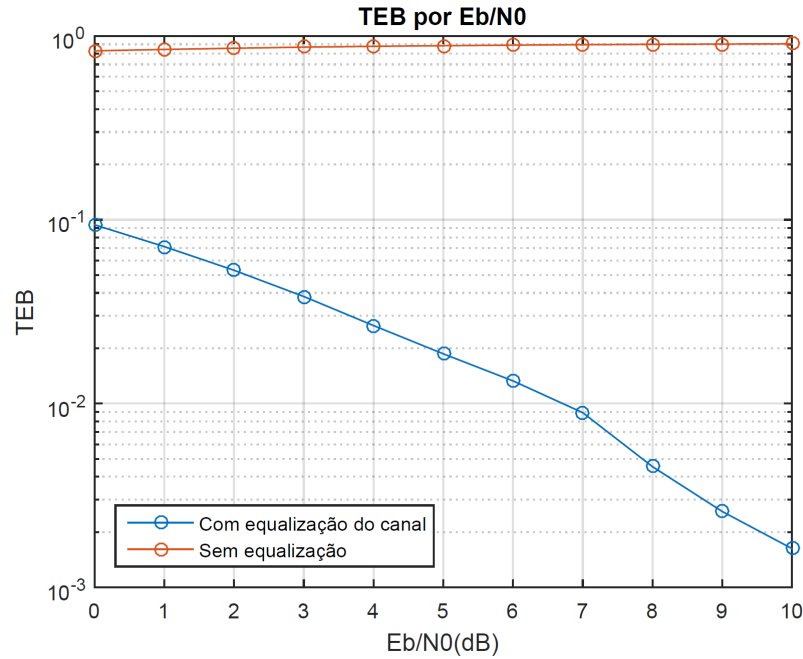


Figura 20 – Curvas  $E_b/N_0$  por TEB para um sistema com equalização do canal TTE e outro sem esta.

A figura 20 representa graficamente um dos itens explicados na subseção anterior. É possível ver que a taxa de erro de bit alcança valores bem superiores do que quando ocorre a equalização do canal. Isso ocorre pois o receptor não está adequado a receber bits com influência deste canal sem a equalização, com isso ocorre uma alta taxa de erro dos bits. Portanto, a presença do equalizador é, sem dúvidas, fundamental para este tipo de sistema para uma menor taxa de erro de bit.

### 5.2.3.1 Filtro Adaptativos - RLS e LMS

Nesta subseção, será discutido e analisado sobre a diferença entre os resultados gerados quando se usa cada um dos dois tipos de algoritmos para filtros adaptativos escolhidos (RLS e LMS).

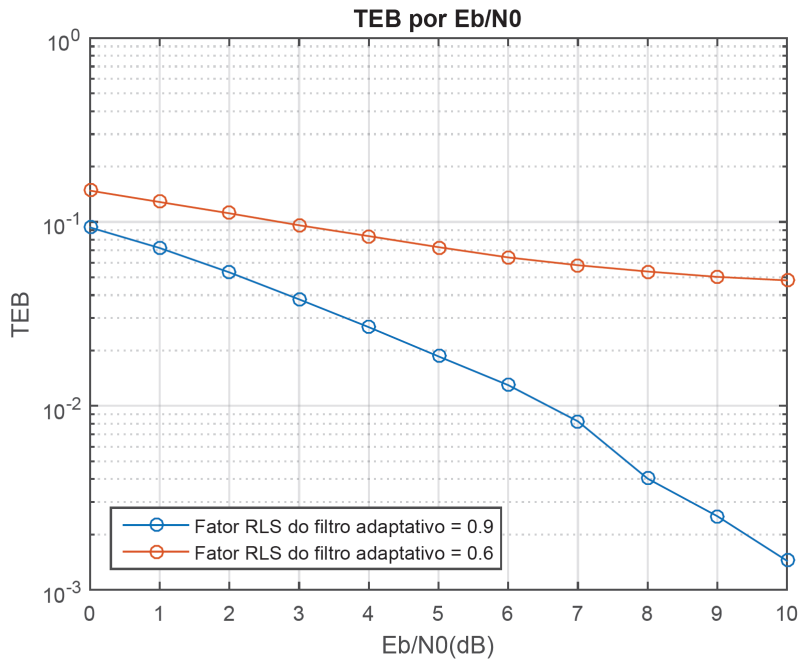


Figura 21 – Curvas  $E_b/N_0$  por TEB para dois valores diferentes do fator de esquecimento RLS.

A equalização do canal é utilizada através dos filtros adaptativos, com isso dependendo da escolha do algoritmo utilizado (RLS ou LMS), a eficiência do filtro será diferente. Além da escolha dos algoritmos, há também a escolha do tamanho do fator de esquecimento  $\lambda$  para o caso do RLS e do fator tamanho do passo  $\mu$ . Para cada um dos fatores, há valores dentro de uma faixa que fazem haver uma convergência mais rápida, como valores perto de 1 para  $\lambda$  e perto de 0 para  $\mu$ .

Na figura 21, é possível ver a diferença entre os fatores RLS escolhidos para o filtro adaptativo FIR. Assim como pode-se observar, o fator deve ser mais próximo do valor um para haver um maior acerto de bits e uma mais rápida convergência.

Cada um destes filtros tem uma taxa de erros associadas com estes dependendo do tipo de filtro e do fator escolhido. Na subseção a seguir será mostrado e explicado mais sobre estes erros.

### 5.2.3.2 Gráficos de Erro

Nesta subseção, será discutido sobre os erros gerados pelo equalizador através do filtro adaptativo variando com dependência no tipo de algoritmo utilizado (RLS ou LMS) e o valor do fator específico de cada utilizado.

A partir das figuras 23 e 22, é possível observar o gráfico de erro do filtro do equalizador para cada um dos casos utilizando diferentes valores de rls. Assim como foi visto anteriormente, um fator mais próximo de um faz com a convergência ocorra mais

rapidamente e assim a taxa de erro de bit seja menor. Além disso, há o fato de o gráfico de erro dar menos ruidoso e oscilante quando o fator de esquecimento está mais perto de um.

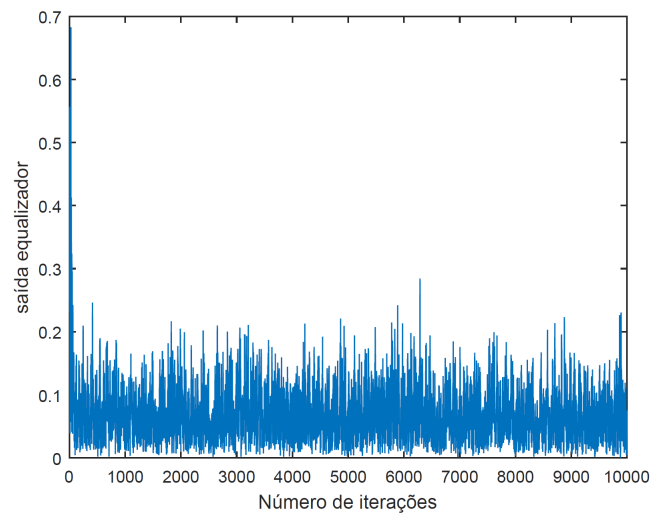


Figura 22 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo RLS com o fator de esquecimento igual a 0.9

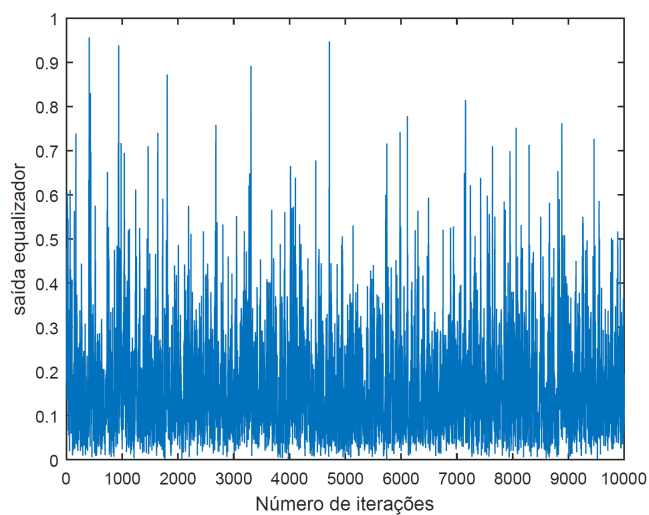


Figura 23 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo RLS com o fator de esquecimento igual a 0.6

A partir da análise e comparação das figuras, é possível ver que em ambos os casos, estes condizem com o explicado anteriormente. Em ambos os casos, há uma convergência relativamente rápida, porém é possível ver que no gráfico da figura 22 há menos oscilações e converge mais rapidamente.

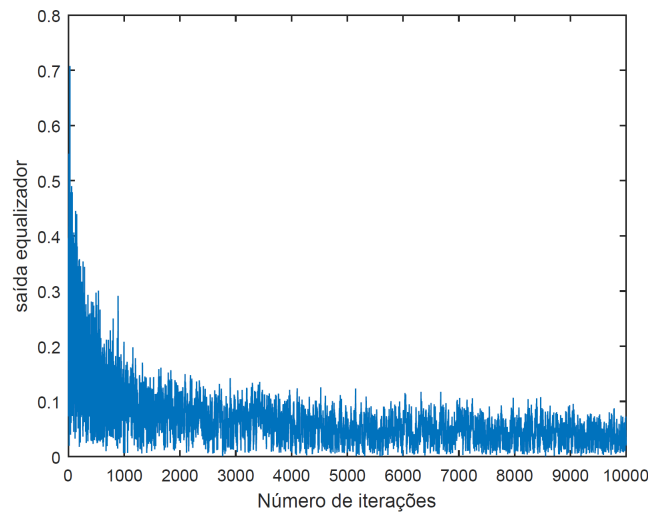


Figura 24 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo LMS com o tamanho do passo igual a 0.1

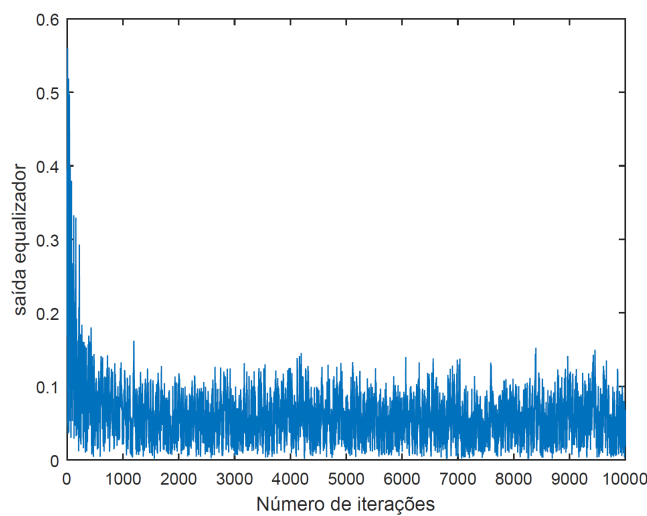


Figura 25 – Gráfico do erro para um filtro adaptativo LMS com o tamanho do passo igual a 0.5

A partir das figuras 24 e 25, é possível ver o gráfico de erro do filtro do equalizador para dois casos de LMS com tamanho do passo igual a 0.1 e 0.5, respectivamente. Assim como foi visto anteriormente, um fator mais próximo de zero faz com a convergência ocorra mais rapidamente e assim a taxa de erro de bit seja menor, de maneira análoga à quando se usa RLS. Além disso, há o fato de o gráfico de erro dar menos ruidoso e oscilante quando o fator de esquecimento está mais perto de zero.

Assim como no caso do RLS, é possível ver que em ambos os casos, estes condizem com o explicado anteriormente. Em ambos os casos, há uma convergência e, com isso,

uma há uma convergência relativamente rápida, porém é possível ver que no gráfico da figura 25 há uma há menos oscilações e converge mais rapidamente.

Portanto, após a análise dos gráficos é possível observar que a convergência ocorre mais rápido quando utilizado o algoritmo RLS. Com isso, haverá uma menor taxa de erro de bit para este caso, lembrando que o fator de esquecimento deve ser próximo de um para um melhor resultado. Consultar (19) para mais sobre de filtros adaptativos.

#### 5.2.4 Ordem da Modulação

Nesta seção, há a comparação entre os diferentes resultados obtidos a partir da mudança da ordem de modulação, ou seja, do aumento do número de bits por símbolo.

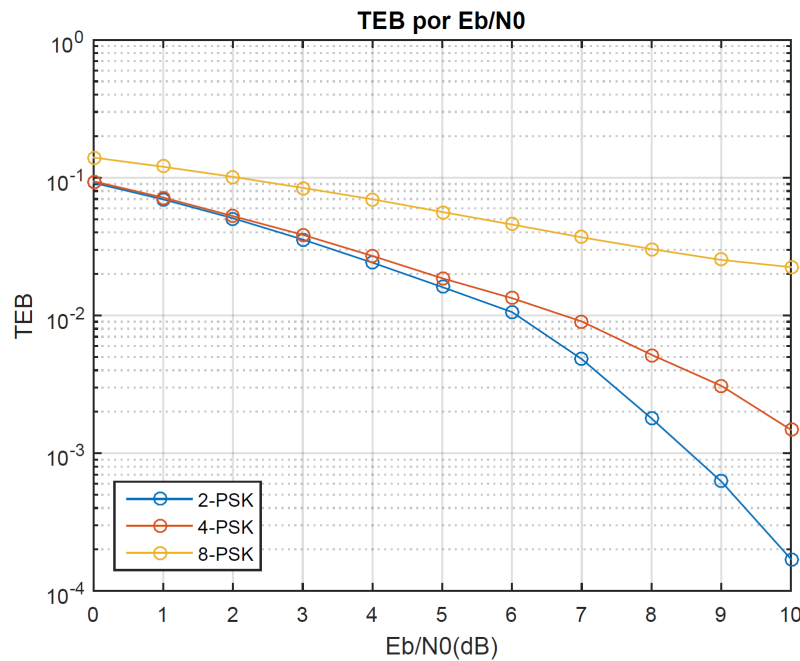


Figura 26 – Curvas  $E_b/N_0$  por TEB para três diferentes ordens de modulação.

Após a análise do gráfico, é possível observar que, assim como previsto, a taxa de erro de bit é menor para os casos de menor ordem de modulação. Além disso, a discrepância entre estes aumenta à medida que o valor de  $E_b/N_0$  aumenta sendo mais visível no final.

#### 5.2.5 Número de Portadoras

Nesta seção, será realizada a análise do efeito da variação do número de portadoras na eficiência do sistema. Isto se dará através da comparação entre os diferentes resultados obtidos a partir da variação no valor das subportadoras utilizadas no bloco da modulação.

Para a análise, foram obtidos gráficos de 8, 16 e 32 portadoras utilizando OFDM e um utilizando apenas PSK como modulação.

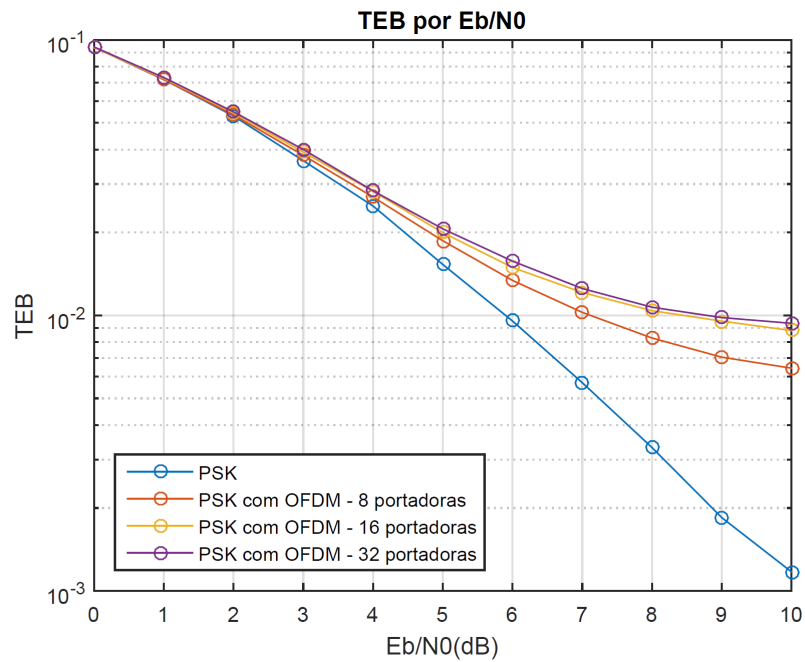


Figura 27 – Curvas Eb/N0 por TEB para quantidades diferentes de subportadoras.

Analisando a figura 27, é observado que há uma melhor eficiência para um menor número de portadoras, ou seja, há um melhor TEB a partir de um determinado valor de Eb/N0.



## 6 Conclusão

Este trabalho diz respeito a sistemas de comunicação digital sem fio de minas terrestres em casos de acidentes (TTE). Assim como explicado nos primeiros capítulos do trabalho, esta é uma área muito susceptível a diversos tipos de acidentes e onde a comunicação é algo imprescindível, mas que possui diversos entraves. Com isso, foi definido que este trabalho teria como objetivo a construção de um simulador de enlace de um sistema de comunicação TTE em um ambiente de minas subterrâneas.

Primeiramente, foram realizadas pesquisas bibliográficas para a definição dos parâmetros e blocos que seriam utilizados neste trabalho. Estas pesquisas bibliográficas foram direcionadas nos seguintes assuntos: tipos de comunicações existentes nas minas subterrâneas, partes fundamentais de sistema de comunicações (como os codificadores de voz e os códigos corretores de erro) e caracterizações de canal para ambientes deste tipo.

Posteriormente, após a realização da primeira etapa de pesquisas bibliográficas, foi definido os blocos que seriam utilizados no simulador e quais funcionalidades este deveria possuir. Com isso, começou-se a implementação do código e com isso a criação do simulador no software MATLAB.

Por fim, com a criação do simulador, foram realizadas, inicialmente, validações para confirmar a veracidade dos resultados do programa e, após isto, foram realizadas diversas simulações. Estas, presentes no capítulo anterior a este, mostram que o simulador construído durante este trabalho realiza as funções desejadas.

Este simulador foi construído com a possibilidade de sua melhora no futuro, ou seja, é possível acrescentar novas partes no código onde seria possível aumentar o número de possibilidades. Como exemplo, é possível citar o fato de que seria plenamente possível a adição de novos códigos corretores de erro, assim como outros tipos de modulação e adição de outros tipos de canais. Além disso, este programa, como simulador, tem a capacidade, no futuro, de ter uma interface associada a ele ou trabalhar realizando diversas simulações diversas através de arquivos de parâmetros. Isto depende do tipo de uso que se deseja dar a este, pois utilizando interface gráfica existe uma facilidade de operação do usuário porém não é possível realizar muitos testes de uma vez, na maioria das vezes. Os simuladores de arquivo de parâmetro, por sua vez já utilizados em diversos programas, é útil para quando a facilidade de operação do usuário não é tão importante quanto o seu desempenho.



# Referências

- 1 FOROOSHANI, A. et al. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 15, n. 4. Citado 6 vezes nas páginas 15, 21, 25, 26, 27 e 28.
- 2 UNION, I. T. G.723.1 - series g: Transmission systems and media, digital systems and networks. Geneva, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 30.
- 3 SEÇÃO: Rádio e TV. TV Digital I: Reed Solomon e Viterbi. <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentri1/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentri1/pagina_2.asp)>. Accessed: 2015-10-25. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.
- 4 SEÇÃO: Tutoriais Redes Opticas Wimax: Modulação. <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimaxiee802/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimaxiee802/pagina_2.asp)>. Accessed: 2015-10-25. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 33.
- 5 CHAPTER 4 Phase Shift Keying. <[http://www.artechhouse.com/uploads/public/documents/chapters/xiong\\_863\\_ch04.pdf](http://www.artechhouse.com/uploads/public/documents/chapters/xiong_863_ch04.pdf)>. Accessed: 2015-10-25. Citado 3 vezes nas páginas 15, 33 e 34.
- 6 INTINI, A. Orthogonal frequency division multiplexing for wireless networks multiplexing for wireless networks. University of California – Santa Barbara, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 15, 34 e 35.
- 7 CONCEPTS of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN. <[http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm)>. Accessed: 2015-11-01. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 36.
- 8 AYUSO, N. et al. Through-the-earth magnetic field propagation: Modelling for underground applications. Universidad de Zaragoza. Citado 3 vezes nas páginas 15, 40 e 41.
- 9 YARKAN, S.; GUZELGOZ S. ARSLAN, H.; MURPHY, R. Underground mine communications: A survey. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, n. 3. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.
- 10 PITTMAN, W.; CHURCH, R.; MCLENDON, J. Through-the-earth electromagnetic trapped miner location systems. a review. Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, and the University of Alabama. Citado na página 22.
- 11 ALENCAR, M. *Telefonia Digital*. Rio de Janeiro, 1998. Citado na página 29.
- 12 LATHI, B.; DING, Z. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. [S.l.], 2009. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 33 e 34.
- 13 TRUONG, T. The development of error-correcting codes. Department of Information Engineering, I-Shou University, Kaohsiung County, Taiwan, 840, R.O.C. Citado na página 31.

- 14 ORTHOGONAL Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks Multiplexing for Wireless Networks. University of California – Santa Barbara, 2000. Citado na página 35.
- 15 DUKKIPATI, R. *MATLAB An Introduction with Applications*. Connecticut, USA, 2010. Citado na página 36.
- 16 GRIFFITHS, D. *An Introduction to Matlab*. University of Dundee, Scotland, UK., 2012. Citado na página 36.
- 17 SILVA, L. et al. Comunicações em minas subterrâneas. UnB, Brasília. Citado na página 44.
- 18 SILVA, L. et al. Modelagem de canal para sistemas de comunicações através da terra (tte). UnB, Brasília. Citado na página 44.
- 19 HAYKIN, S. *Adaptive filter theory (5th Edition)*. [S.l.], 2013. Citado na página 53.

# Anexos



## ANEXO A – Código do simulador

```

1
2 clear all
3 clc
4
5 %%Primeira parte do programa
6 %%Definição de Variáveis
7 %Variáveis editáveis
8 cod_corretor_erro=0;%0 para Reed Solomon, 1 para desligar
9 modulacao=1;%0 para PSK com ofdm, 1 para apenas psk;
10 num_port=8;%numero de subportadoras – só se aplica quando usar
    OFDM
11 ordem_mod=4;%ordem da modulação PSK
12 ruido = 1;%0 para ruído TTE, 1 para ruído branco, 2 para sem
    ruido
13 canal = 0;%0 para canal TTE, 1 para sem canal
14 entrada =1;%0 para utilizar dados de gravação de voz, 1 para
    utilizar dados aleatórios
15 EbN0 = [0:10];
16 equaliz =0; %0 para equalização ligada, 1 para equalização
    desligada
17 filt_eq =0;%0 para rls, 1 para lms
18 rls_ft = 0.9;%fator de esquecimento – quando rls
19 lms_ft = 0.1;%tamanho do passo – quando lms
20
21
22 %variáveis fixas relacionadas com o canal e ruído TTE
23 mi = 4*pi*1e-7;
24 sigma = 0.01;
25 r = 200;
26 f_opt = 1*(16/(2*pi*sigma*mi*r^2));
27 beta = 0.5;
28 fc = f_opt;
29 R_max = 2*fc/(1 + beta);
30 sampsPerSym = 8;
31 Fs = 3750*sampsPerSym;

```

```
32 imp_2 = 7;
33 a = 0.7;
34
35 %%Definição do tipo de dado utilizado (dados aleatórios ou dados
    obtidos
36 %%através de gravação
37
38 if (entrada ==0)
39
40     %variáveis fixas
41     freq=8000;% frequencia – gravação do áudio
42     nbits = 16;%24;%numero de bits – gravação do áudio
43     tempo = 5;%tempo do áudio – gravação do áudio
44     ncal = 1;%numero de canais – gravação do áudio
45
46     %Variáveis editáveis RS
47     n=8;
48     k=3;
49     r1 = k/n;
50
51
52
53     recObj = audiorecorder(freq ,nbits ,ncal);
54
55     %Gravando em um tempo de duração de tempo s
56     disp('Start speaking.')
57     recordblocking(recObj , tempo);
58     disp('End of Recording.');
```

```
59
60     %transformando a variavel recObj para ser possivel
61     %escreve-lo em um arquivo .wav
62     myRecording = getaudiodata(recObj);
63
64
65     %escrevendo a variável obtida na gravação em um arquivo .wav
66     wavwrite(myRecording , freq , nbits , 'sample');
67
68
69     %função do G7231 para o codificar o áudio
```



---

```

70     G7231Coder( 'sample.wav', 'audio_codificado.bit' );
71
72     %Abrindo o arquivo gerado pelo codificador do áudio
73     fileID = fopen( 'audio_codificado.bit', 'r' );
74     A1 = fread( fileID );
75     b = de2bi(A1,8, 'left-msb' );
76
77     [tam1 tam2] = size(b);
78
79     resp=zeros(tam1*8,1);
80     tam1=tam1*8;
81     w=1;
82     z=1;
83     for i=1:tam1
84         for j1=1:1
85             resp(i,j1)=b(w,z);%           ((i-1)*1)+j);
86         end
87         z=z+1;
88         if (z==9)
89
90             z=1;
91             w=w+1;
92
93         end
94     end
95 end
96
97
98
99 %entrada do bloco sendo números gerados aleatoriamente
100 if(entrada == 1)
101
102
103 %           %definindo dados que serão utilizados na codificação Reed
           Solomon
104     m = 8;
105     t=16;
106     n = 2^m - 1;
107     k = n - 2*t;

```

```
108     r1 = k/n;
109
110     bittotal = 1e6;
111     blocos = floor( bittotal/(m*k*log2(ordem_mod)) );
112     mensagem = blocos*m*k;
113     resp = randi([0 1],mensagem,1);
114
115
116 end
117
118 %%
119 %%Bloco do Código Corretor de Erro. É escolhido se vai utilizar
    o código
120 %%corretor de Reed Solomon ou se não vai utilizar a codificação
121
122 if (cod_corretor_erro==0)
123
124     %variaveis de configuracao do codificador Reed Solomon (RS)
125     %enc = comm.RSEncoder(n,k,'BitInput',true);
126     if(entrada ==0)
127         enc = comm.RSEncoder(n,k,'BitInput',true);
128     end
129
130     if(entrada ==1)
131         gp = rsgenpoly(n,k,[],0);
132         enc = comm.RSEncoder(n,k,gp,'BitInput',true);
133     end
134
135
136     %utilizando a função Step para realizar a codificação RS
137     Y = step(enc,resp);
138
139 end
140
141
142 if(cod_corretor_erro == 1)
143
144     Y = resp;
145
```

---

```
146 end
147
148
149
150 %%
151 %Bloco da Modulação. É utilizado PSK ou PAM para modular os
    dados que serão
152 %utilizados na modulação OFDM
153
154 %modulação PSK
155
156
157
158
159 if (modulacao==0)
160     [tam1y tam2y] = size(Y);
161     v = rem(tam1y/log2(ordem_mod), num_port);
162
163     if(v ~= 0)
164
165         %adicionando zeros no vetor de dados para ficar ser poss
            ível modular
166         valor = num_port-v;
167         valor1 = valor*log2(ordem_mod);
168         Y1=padarray(Y,[ valor1 0], 'post');
169
170     end
171
172     if(v == 0)
173
174         Y1 = Y;
175
176     end
177
178
179     mod_qpsk = comm.PSKModulator(ordem_mod, 'BitInput', true);
180     modData = step(mod_qpsk, Y1);
181
182     %reajustando o vetor de números complexos para uma matriz
```

```

183     %para ser entrada da função OFDM sendo cada sub portadora
184     %representado por uma linha da matriz
185     [tamanho1 tamanho2] = size(modData);
186     retest1 = reshape(modData,num_port,tamanho1/num_port);
187     [tamd1 tamd2] = size(retest1);
188
189     %função OFDM com o número de portadoras sendo determinado
190     %por num_port
191     hMod = comm.OFDMModulator('FFTLength',num_port, ...
192     'NumGuardBandCarriers',[0;0],...
193     'PilotInputPort',false, ...
194     'NumSymbols',tamd2, ...
195     'CyclicPrefixLength', 0, ...
196     'InsertDCNull',false);
197     modDim = info(hMod);
198
199     dataIn = retest1;
200
201     modData1 = step(hMod,dataIn);
202
203 end
204
205 if(modulacao==1)
206     Y1=Y;
207     mod_qpsk = comm.PSKModulator(ordem_mod,'BitInput',true);
208     modData1 = step(mod_qpsk, Y1);
209
210 end
211
212 %%
213 %Bloco do Canal TTE
214 %Há a possibilidade da escolha entre Canal TTE e sem canal.
215
216 %canal TTE
217 if (canal == 0)
218
219     [C,c,c_lp] = TTE_FIR(mi,sigma,r,Fs,fc);
220     yinterpolado = interp(modData1,4);
221     y_channel1 = filter(c,1,yinterpolado);

```

---

```

222     y_channel = y_channel1(1:4:length(y_channel1));
223
224
225     E_signal = 10*log10(mean(abs(y_channel).^2));
226     TER = zeros(length(EbN0),1);
227
228     %equalizador do canal
229     if(filt_eq == 0)
230
231         equalizador = lineareq(20, rls(rls_ft));
232     end
233
234     if(filt_eq ==1)
235
236         equalizador = lineareq(20, lms(lms_ft));
237     end
238
239     if(equaliz==0)
240     [y_channel, YD, E] = equalize(equalizador, y_channel,
        modData1);
241     end
242
243 end
244
245
246 %sem canal
247 if(canal == 1)
248     yinterpolado = interp(modData1,4);
249     %y_channel = modData1;
250     y_channel = yinterpolado(1:4:length(yinterpolado));
251     E_signal = 10*log10(mean(abs(y_channel).^2));
252                                     % Signal energy
253     TER = zeros(length(EbN0),1);
254 end
255
256 for posicao=1:length(EbN0)
257
258     %%cálculo do ruído

```

```

259 %ruído TTE
260 if (ruído ==0)
261
262     SNR = EbN0(posicao) + 10*log10(r1*log2(ordem_mod)) - 10*
        log10(sampsPerSym);
263     E_noise = E_signal - SNR;
264     noise = real(noiseTTE(a,imp_2,length(y_channel),E_noise));
265 end
266
267 %ruído branco
268 if(ruído == 1)
269     SNR = EbN0(posicao) +10*log10(log2(ordem_mod)) -10*log10(
        sampsPerSym);
270     E_noise = E_signal - SNR;
271     noise = awgn(y_channel,SNR+3,'measured');
272 end
273
274 %sem ruído
275 if(ruído == 2)
276
277     noise = 0;
278
279 end;
280
281 %Como os ruídos são aditivos então deve-se apenas soma-los ao
        canal
282 y_channel_final = y_channel + noise;
283
284 %%
285 %Bloco da Demodulação.
286
287 %Segunda Parte do Programa
288 if (modulacao==0)
289
290 hDemod = comm.OFDMDemodulator('FFTLenght',num_port, ...
291 'NumGuardBandCarriers',[0;0],...
292 'PilotOutputPort',false, ...
293 'NumSymbols',tamd2, ...
294 'CyclicPrefixLength', 0, ...

```

---

```

295 'RemoveDCCarrier', false, ...
296 'NumReceiveAntennas', 1);
297
298 demodData = step(hDemod, y_channel_final);
299 retest1 = reshape(demodData, tamanho1, 1);
300
301 %Demodulação PSK
302     demod_qpsk = comm.PSKDemodulator(ordem_mod, 'BitOutput', true
303         );
304     demodData1 = step(demod_qpsk, retest1);
305     if(v ~= 0)
306         %retirando os zeros que foram adicionados no bloco da Modula
307         ção
308         %para ser possível modula-los
309         demodData1 = demodData1(1:end-valor*log2(ordem_mod), :);
310
311 end
312
313 if(modulacao == 1)
314     demod_qpsk = comm.PSKDemodulator(ordem_mod, 'BitOutput', true
315         );
316     demodData1 = step(demod_qpsk, y_channel_final);
317 end
318
319
320
321
322
323 %%
324 %Bloco da Decodificação.
325 %Código de Reed Solomon
326 if (cod_corretor_erro==0)
327
328     %variaveis de configuracao do codificador Reed Solomon (RS)
329     if(entrada == 0)
330         dec = comm.RSDecoder(n, k, 'BitInput', true);

```

```
331     end;
332
333     if(entrada == 1)
334         dec = comm.RSDecoder(n,k,gp,'BitInput',true);
335     end
336     %utilizando a função Step para realizar a encodificação RS
337
338     X = step(dec,demodData1);
339
340 end
341 %Sem codificação
342 if(cod_corretor_erro == 1)
343
344     X = demodData1;
345
346 end
347
348 %Cálculo do BER (Bit Error Rate) ou TER (Taxa de Erro de Bit)
349 d = xor(X,resp);
350 TER(posicao) = sum(d)/length(d);
351 end
352
353 %%
354 %Quando os dados utilizados virem de gravação então será
    realizado o
355 %decodificador de áudio
356 if(entrada ==0)
357
358     [tam11 tam12] = size(X);
359     resp_out=zeros(tam11/8,8);
360     tam2=tam11/8;
361     w=1;
362
363     for i=1:tam2
364         for j1=1:8
365             resp_out(i,j1)=X(w,1);
366             w=w+1;
367         end
368     end
```



```
369
370     d = bi2de(resp_out, 'left-msb');
371     fileID2 = fopen('arquivo_decodificacaoRS.bit', 'w+');
372
373
374     %escrevendo a mensagem decodificada em um arquivo
375     fwrite(fileID2, d);
376
377     G7231Decoder('arquivo_decodificacaoRS.bit', 'new_audio.wav');
378     fclose(fileID);
379     fclose(fileID2);
380 end
381
382
383 %%
384 %plotando EbN0 por TER
385 semilogy(EbN0, TER, 'o-')
386 xlabel('Eb/N0(dB)')
387 grid on
388 ylabel('TEB')
389 title('TEB por Eb/N0')
390 hold on
```